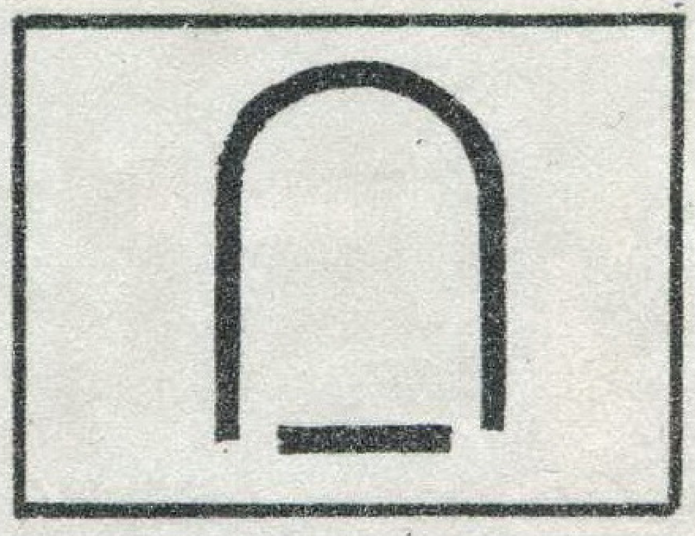
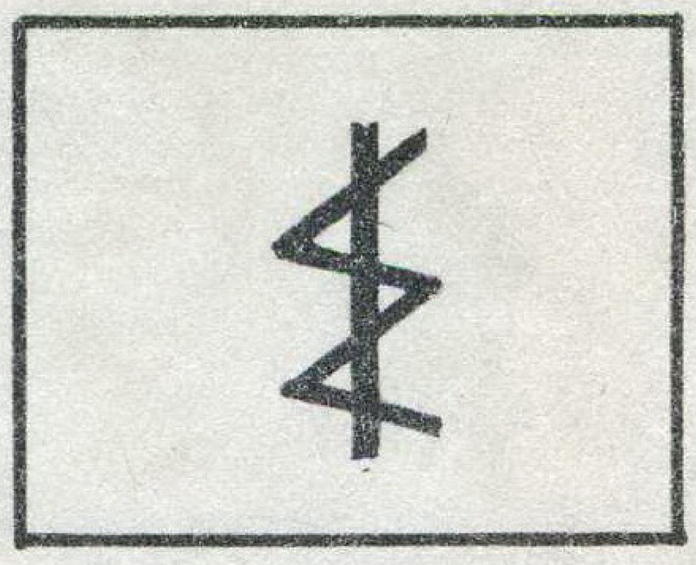
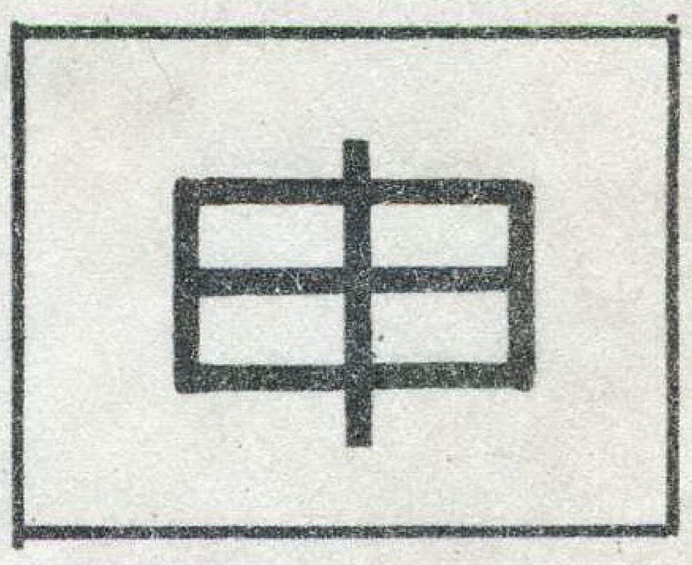
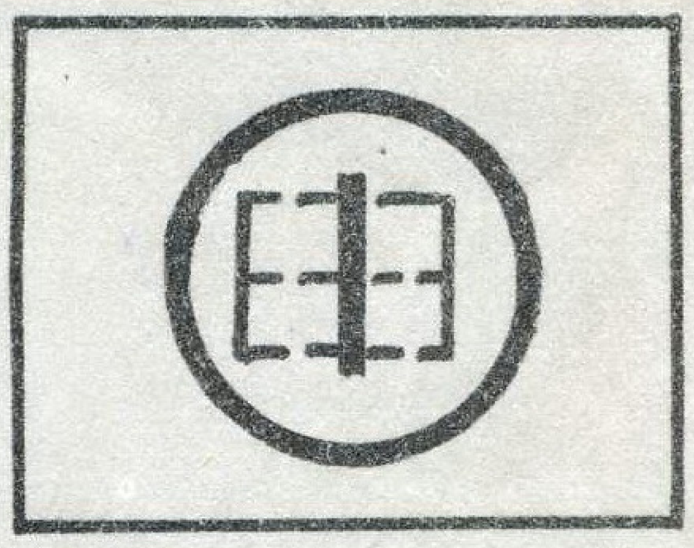
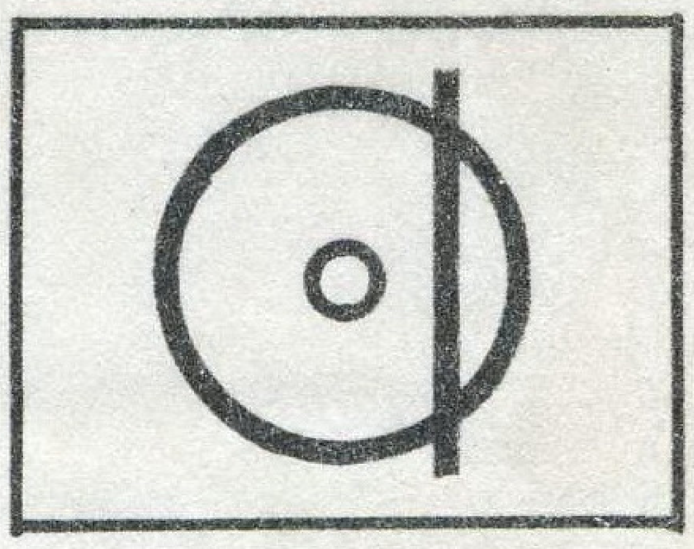
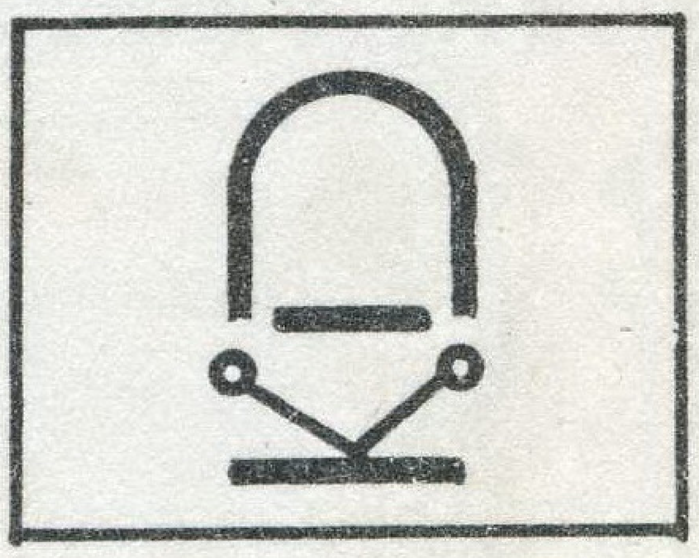
Ф. Р. КІТУНОВІЧ

ЭЛЕКТРА-ТЭХНІКА

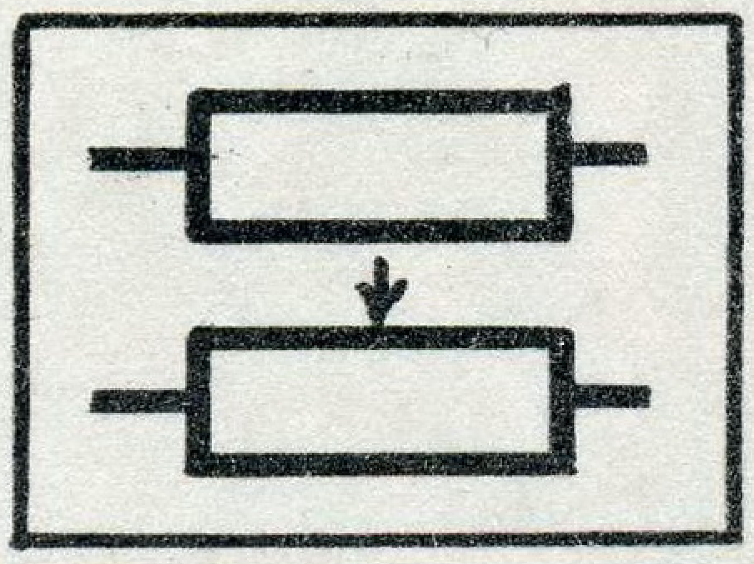
УМОЎНЫЯ АБАЗНАЧЭННІ НА ШКАЛАХ ЭЛЕКТРАВЫМЯРАЛЬНЫХ ПРЫБОРАЎ

Амперметр Вальтметр	A V	Магніта-электрычны прыбор	
Мілівальтметр Кілавальтметр	mV kV	Электра-магнітны прыбор	
Міліамперметр Мікраамперметр	mA μA	Электра-дынамічны прыбор	
Ватметр Кілаватметр	W kW	Ферадына-мічны прыбор	
Ватметр рэактыўнай магутнасці Кілаватметр рэактыўнай магутнасці	WR kWR	Індукцыйны прыбор	
Омметр Кілаомметр	Ω kΩ	Тэрма-электрычны прыбор	

УМОЎНЫЯ АБАЗНАЧЭННІ НА СХЕМАХ

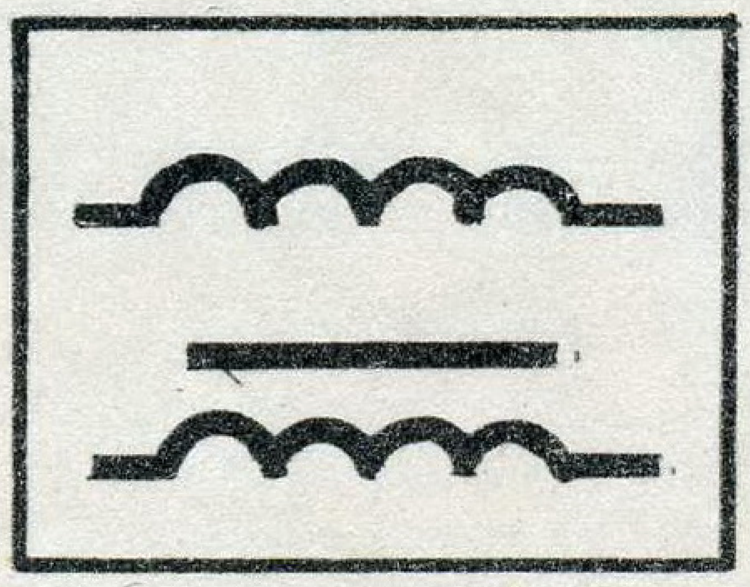
Рэзістар пастаянны

Рэзістар пераменны



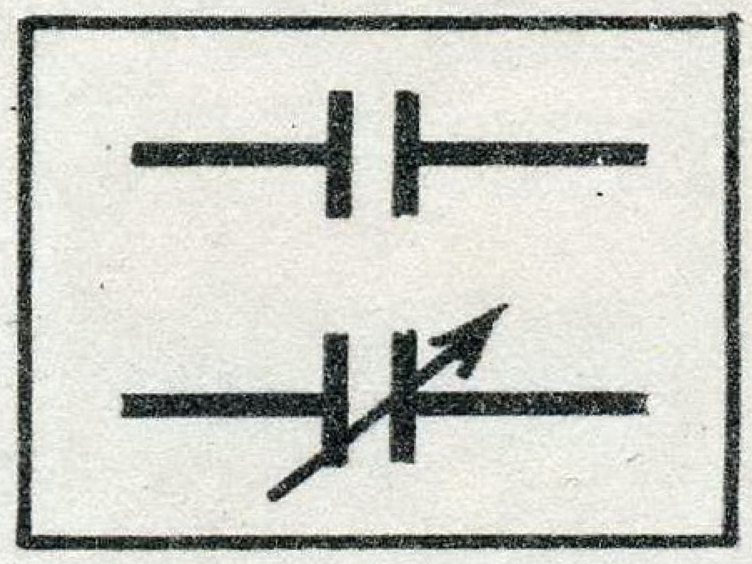
Шпуля індуктыўнасці, дросель без магнітапровада

Дросель з ферамагнітным магнітапровадам



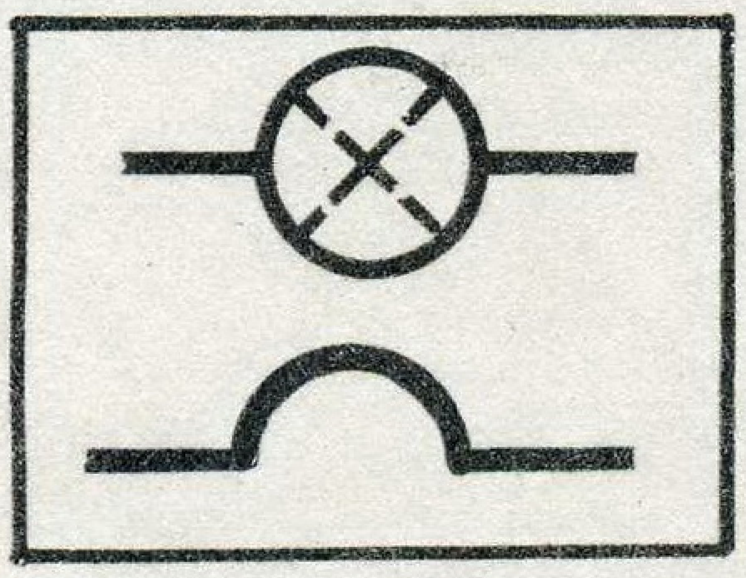
Кандэнсатар пастаяннай ёмістасці

Кандэнсатар пераменнай ёмістасці



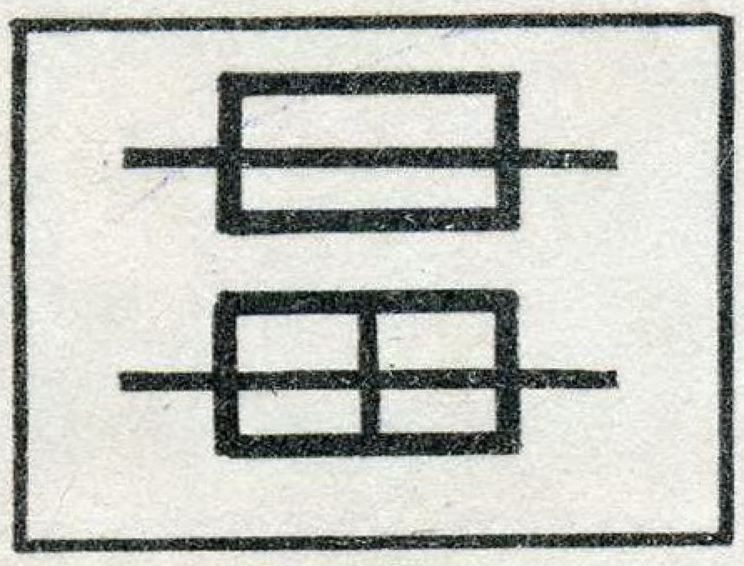
Лямпачка напальвання

Награвальны элемент



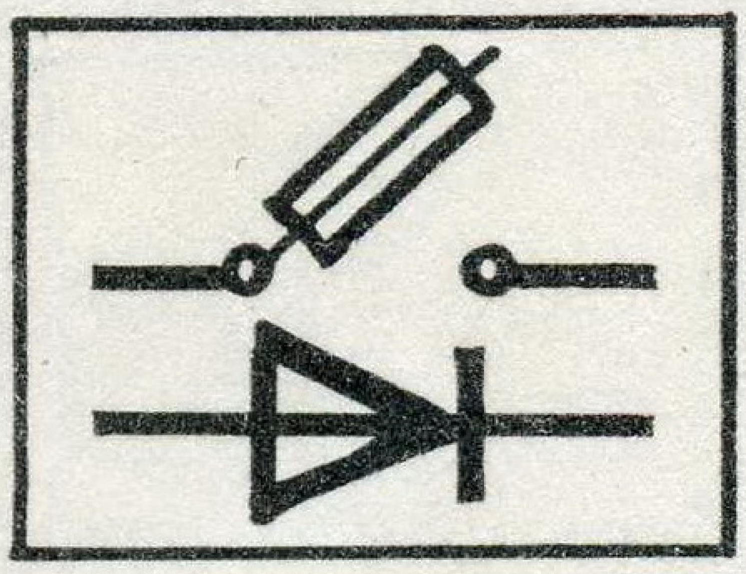
Засцерагальнік плаўкі

Засцерагальнік тугаплаўкі

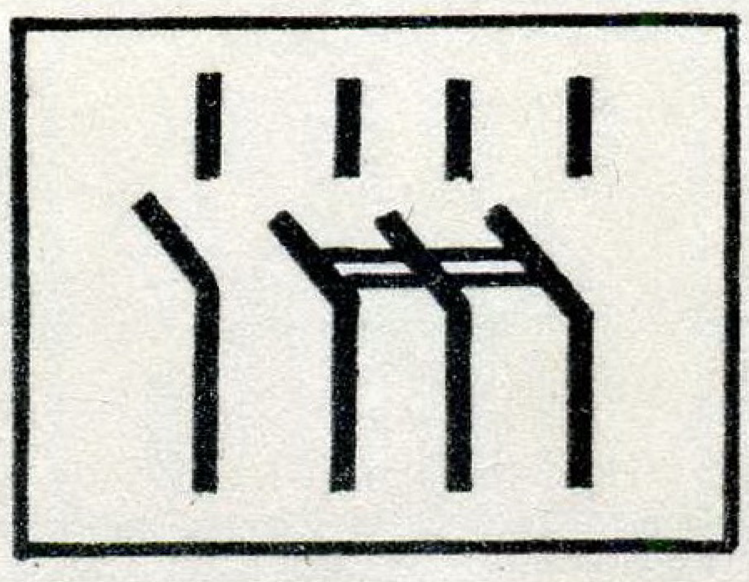


Выключальнік-засцерагальнік

Дыёд

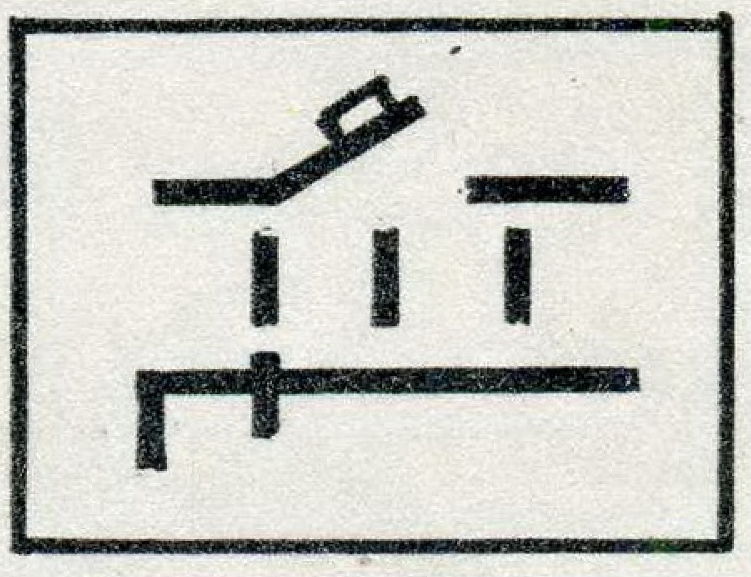


Выключальнікі аднаполюсны і трохполюсны

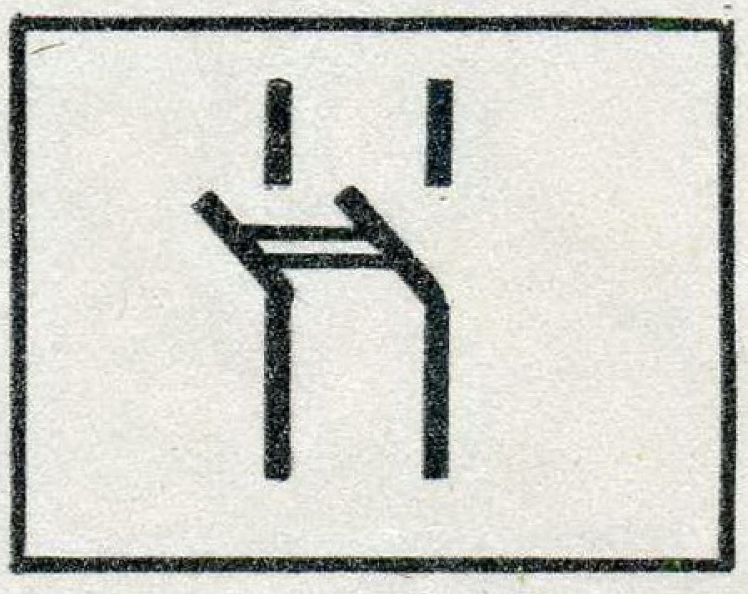


Кантакт з аўтаматычным зваротам пры перагрузцы

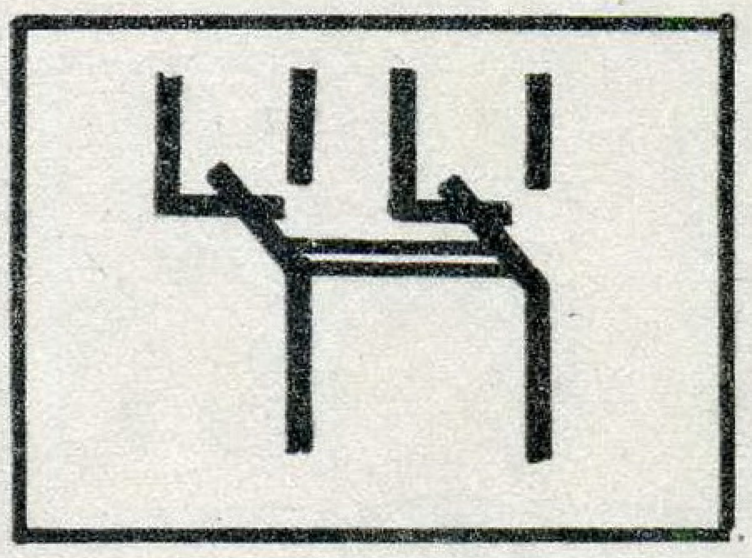
Пераключальнік аднаполюсны трохпазіцыйны



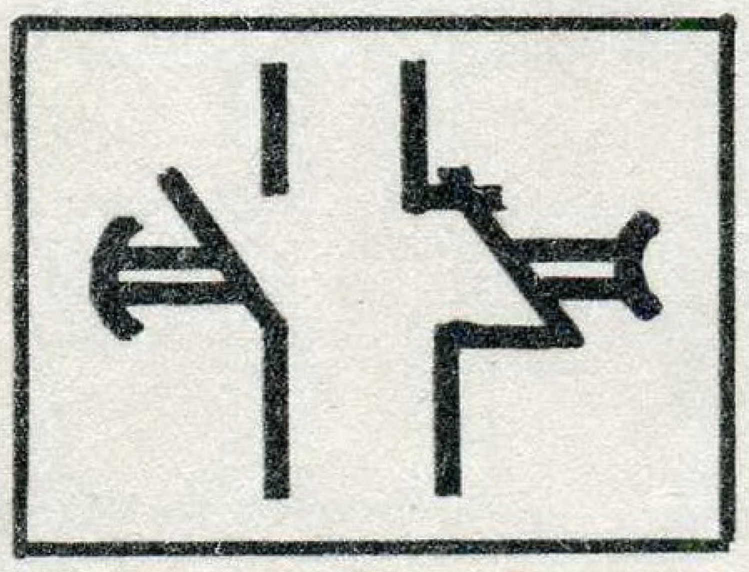
Выключальнік двухпазіцыйны



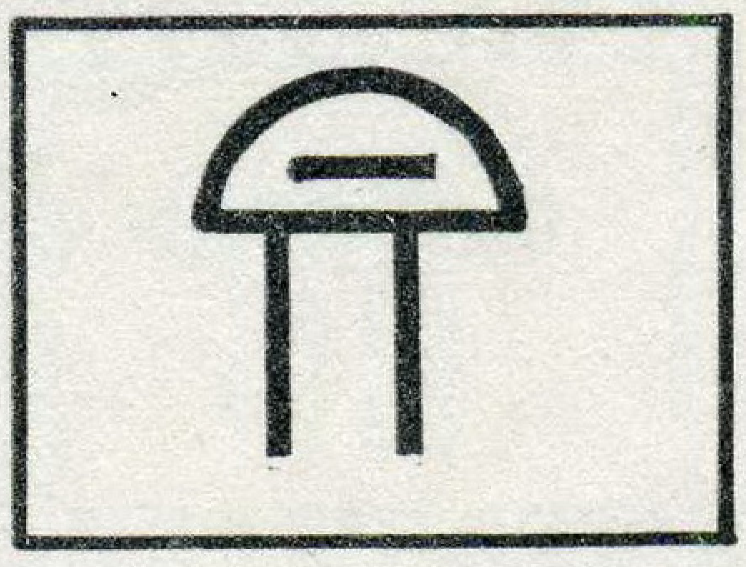
Пераключальнік двухпазіцыйны



Кантакты замыкальны і размыкальны з запавольнікам, які дзейнічае пры спрацоўцы



Электрычны званок пастаяннага току



Электрычны званок пераменнага току

Ф. Р. КІТУНОВІЧ

ЭЛЕКТРА-ТЭХНІКА

Зацверджаны Міністэрствам адукацыі і навукі Рэспублікі Беларусь у якасці падручніка для студэнтаў педагагічных вышэйшых навучальных установ

МІНСК
"ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА"
1997

84.289
К45

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.21я7
К 45

Рэцэнзенты: кафедра фізікі Віцебскага дзяржаўнага педагагічнага інстытута; доктар тэхнічных навук, прафесар кафедры агульнай фізікі Маскоўскага абласнога педагагічнага універсітэта М. А. Сямёнаў

Кітуновіч Ф. Р.
К45 Электратэхніка: Падруч. — Мн.: Выш. шк., 1997. — 391 с.: іл.
ISBN 985-06-0064-0.

Выкладаецца тэарэтычны матэрыял па ланцугах аднафазнага і трохфазнага току, электрычных прыборах і вымярэннях, трансфарматарах, машынах пастаяннага і пераменнага току, элементах аўтаматыкі, бытавой электратэхнікі, вытворчасці, перадачы і размеркаванні электрычнай энергіі.

Для студэнтаў педагагічных вышэйшых навучальных устаноў, можа быць карысным студэнтам ВТНУ і настаўнікам сярэдняй школы.

ББК 31.21я7

ISBN 985-06-0064-0
© Ф. Р. Кітуновіч, 1997
© Выдавецтва «Вышэйшая школа», 1997

ПРАДМОВА

Падручнік створаны ў адпаведнасці з праграмай курса «Электратэхніка» для студэнтаў педагагічных універсітэтаў і інстытутаў па спецыяльнасцях П. 01.02.01, П. 01.02.03 (спецыялізацыі: фізіка і матэматыка; фізіка, інфарматыка і тэхнічная творчасць).

У падручніку змешчаны тэарэтычны матэрыял курса «Электратэхніка»: электрычныя ланцугі аднафазнага і трохфазнага току; электрычныя прыборы і электрычныя вымярэнні; трансфарматары; нелінейныя ланцугі і выпрамнікі; машыны пераменнага і пастаяннага току; элементы аўтаматыкі; бытавая электратэхніка; вытворчасць, перадача і размеркаванне электрычнай энергіі; элементы тэхнікі бяспекі.

Пры выкладанні вучэбнага матэрыяла раскрываецца фізічная заканамернасць электрычных працэсаў у ланцугах, апаратах і машынах пастаяннага і пераменнага току. Даецца апісанне 16 лабараторных работ, якія маюць практычнае значэнне ў прафесійнай падрыхтоўцы настаўніка фізікі. Пры выкананні лабараторных работ асноўная ўвага звяртаецца на набыццё ўменняў і навыкаў збіраць электрычныя ланцугі, рабіць вымярэнні велічынь, вывучаць работу электрычных машын і апаратаў, рэле ў розных рэжымах, выконваць электрамантажныя работы.

Хаця вучэбным планам па гэтым курсе не прадугледжаны час на рашэнне задач, аўтар палічыў неабходным змясціць у падручніку шэраг электратэхнічных задач. У канцы кожнага параграфа даецца пэўная колькасць пытанняў і задач для самаправеркі, а ў канцы кнігі прыведзены прыклады рашэння тыповых задач.

Падручнік можа быць карысным студэнтам ВТНУ і настаўнікам сярэдняй школы.

Аўтар

УВОДЗІНЫ

Электратэхніка — гэта навука аб вытворчасці, перадачы і практычным выкарыстанні электрычнай энергіі. Яе ўзнікненне і развіццё звязана з імёнамі многіх выдатных рускіх і зарубежных вучоных. У 1802 г. В. У. Пятроў атрымаў электрычную дугу і выказаў меркаванні пра магчымасці яе практычнага выкарыстання для асвятлення, плаўкі металаў. Англійскі фізік Фарадэй у 1821 г. ажыццявіў вярчэнне праваднікa з токам вакол магніта, стварыў такім чынам дзейную мадэль будучага электрарухавіка. У 1831 г. ён адкрыў з'яву электрамагнітнай індукцыі, якая склала аснову сучаснай электратэхнікі. Выдатным рускім вучоным Б. С. Якобі былі зроблены тэарэтычныя даследаванні электрамагнітных з'яў, пакладзеныя ў аснову сучаснай тэорыі электрычных машын. Вынікам практычнага прымянення гэтых даследаванняў было стварэнне першага ў свеце магнітаэлектрычнага рухавіка, які ў 1839 г. быў выпрабаваны на Няве. Б. С. Якобі вынайшаў гальванапластыку і гальванастэгію, якія далі штуршок практычнаму прымяненню хімічнага дзеяння электрычнага току.

Рускі акадэмік Э. Х. Ленц даследаваў электрамагнітныя з'явы і ўстанавіў закон электрамагнітнай індукцыі. Ён даказаў абарачальнасць электрычных машын пастаяннага току, вывучыў з'яву рэакцыі якара і даследаваў сілу прыцяжэння электрамагніта.

Прафесар Маскоўскага універсітэта А. Р. Сталетаў дасканала даследаваў магнітныя ўласцівасці жалеза. Вынікі гэтых даследаванняў пакладзены ў аснову разліку магнітапровадаў электрычных машын, трансфарматараў і розных апаратаў. Ён адкрыў фотаэфект і стварыў фотаэлемент, які знайшоў шырокае прымяненне ў аўтаматыцы. Рускім вучоным належыць вынаходства электрычнай крыніцы святла.

У 1873 г. А. М. Ладыгін стварыў першую ў свеце лямпу напальвання, а ў 1876 г. П. М. Яблачкаў вынайшаў электрычную свечку, якая была прыменена для асвятлення вуліц Парыжа і другіх гарадоў Еўропы пад назвай «рускае святло». П. М. Яблачкаву належыць вынаходства трансфарматара і распрацоўка розных канструкцый электрычных машын пастаяннага току. Механік Мас-

коўскага універсітэта І. Ф. Усагін удасканаліў трансфарматар. Амерыканскі вучоны Т. А. Эдысон у 1879 г. вынайшаў лямпу напальвання з вугальнай ніццю, патрон і цокаль з вінтавой нарэзкай, электрычны лічыльнік, засцерагальнік з плаўкай устаўкай і шэраг іншых электратэхнічных апаратаў. Ён сканструяваў самыя магутныя для таго часу электрастанцыі агульнага карыстання.

Рускі інжынер М. М. Бернардос у 1882 г. вынайшаў электрычную зварку з выкарыстаннем вугальных электродаў, а ў 1893 г. М. Г. Славянаў на Сусветнай выстаўцы ў Парыжы атрымаў залаты медаль за электразварку металічным электродам.

Асаблівая заслуга ў развіцці электратэхнікі трохфазнай сістэмы належыць М. О. Даліва-Дабравольскаму. У 1888 г. ён пабудаваў трохфазны генератар магутнасцю каля 3 кВт і трохфазны рухавік. У 1891 г. на Сусветнай электратэхнічнай выстаўцы ў Германіі М. О. Даліва-Дабравольскі прадэманстраваў перадачу трохфазнага току магутнасцю 220,8 кВт на адлегласць 175 км. Вялікі ўклад у развіццё электраэнергетыкі ўнеслі савецкія вучоныя: Г. М. Кржыжаноўскі, М. А. Шатэлен, Р. Э. Класон, А. А. Воранаў, К.І. Шэнфер, М. П. Касценка і інш. Яны адыгралі вялікую ролю ў распрацоўцы пытанняў тэорыі і канструявання электрычных машын і апаратаў. Акадэмік У. Ф. Міткевіч і яго вучні П. Л. Калантараў і Л. Р. Нэйман развілі асноўныя палажэнні тэорыі электрамагнетызму і фізічных асноў электратэхнікі.

З пачатку другой паловы XIX стагоддзя электратэхніка выйшла з лабараторый на прасцяг усебаковага практычнага прымянення ў вытворчасці, на транспарце і ў сувязі. Прымяненне электрычнай энергіі ва ўсіх галінах народнай гаспадаркі і ў быце называецца электрыфікацыяй. Ужо ў першыя гады пасля ўстанаўлення савецкай улады пачалося будаўніцтва Шатурскай ДРЭС на падмаскоўным торфе, Кашырскай ДРЭС на падмаскоўным вугалі, Волхаўскай ГЭС паблізу Санкт-Пецярбурга, а ў 1920 г. на VIII Усерасійскім з'ездзе Саветаў быў прыняты Дзяржаўны план электрыфікацыі Расіі (план ДЭЛРА). Па плану ДЭЛРА намячалася на працягу 10—15 гадоў (1920—1935) пабудаваць 20 цеплавых і 10 гідраўлічных раённых электрастанцый агульнай магутнасцю 1,75 млн кВт з гадавой выпрацоўкай электраэнергіі 8,8 млрд кВт·г. Да канца 1935 г. план ДЭЛРА быў перавыкананы ў 2,5 раза. Вялікія рэсурсы арганічнага паліва — каменнага вугалю, нафты, прыроднага газу — далі магчымасць стварыць энергаблокі цеплавых электрастанцый да 500, 800 і 1200 МВт і павысіць магутнасць цеплавых электрастанцый. У цяперашні час у СНД працуюць Запарожская, Углягорская і Кастрамская ДРЭС магутнасцю 3,6 млн кВт, Рэфцінская ДРЭС —

3,8 млн кВт. Выйшлі на праектную магутнасць 2,4 млн кВт Прыдняпроўская, Канакаўская, Зміеўская, Бурштынская, Крыварожская, Славянская, Заінская і Лукомльская ДРЭС. На базе вялікіх залежаў каменнага вугалю ў Канска-Ачынскім басейне (каля 115 млрд т) і Экібастузскім (разам з Майкюбінскім запасам 9,5 млрд т) створаны Экібастузскі паліўна-энергетычны комплекс. Пабудаваны Экібас-тузская ДРЭС-1 магутнасцю 4 млн кВт і Сургужская ДРЭС-1 магутнасцю 6,4 млн кВт.

Да пачатку дванаццатай пяцігодкі на цеплавых электрастанцыях (ЦЭС) Мінэнерга былога СССР было устаноўлена 15 энергаблокаў па 500 тыс. кВт, 12 энергаблокаў па 800 тыс. і адзін энергаблок на 1200 тыс. кВт на Кастрамской ДРЭС. У цяперашні час каля 80 % электрычнай энергіі даюць цеплавыя электрастанцыі, і на бліжэйшую будучыню яны будуць асноўнымі яе крыніцамі.

Заслугоўвае ўвагі стварэнне МГД-электрастанцый. У 1964 г. у СССР упершыню ў свеце быў створаны эксперыментальны МГД-генератар магутнасцю 200 кВт, а ў 1971 г. пабудавана прамысловая электрастанцыя У-25 з МГД-генератарам магутнасцю 25 МВт. У 1973 г. вучонымі СССР і ЗША была складзена праграма сумеснай распрацоўкі буйнамаштабных праектаў МГД-генератараў і іх стыкоўкі з паратурбіннымі, гэта значыць стварэння адзінай сістэмы генерыравання электраэнергіі на МГДАС. Цяпер у СНД вядзецца работа па стварэнні прамысловага блока МГДАС магутнасцю 500 МВт з ККД 50 %. У ЗША пабудавана на вугальным паліве МГД-устаноўка прамысловага тыпу магутнасцю 100 МВт. Інжынерна-канструктарскія работы па стварэнні МГД-генератараў вядуцца ў Японіі, Польшчы, Румыніі і ў іншых краінах. МГД-генератары — больш экалагічна чыстыя крыніцы энергіі, ў стыкоўцы з паратурбіннымі генератарамі павышаюць ККД да 60 %.

Краіны СНД багатыя на вялікія мнагаводныя рэкі, што дае магчымасць будаваць буйныя гідраэлектрастанцыі вялікай магутнасці. На рацэ Волзе пабудавана Волжская ГЭС імя У. І. Леніна магутнасцю 2,3 млн кВт і імя XXII з'езду КПСС магутнасцю 2,5 млн кВт, на Ангары — Брацкая ГЭС магутнасцю 4,5 млн кВт і набірае праектную магутнасць Усць-Ілімская магутнасцю 4,3 млн кВт, на Енісеі пабудавана Краснаярская ГЭС магутнасцю 6 млн кВт і набірае праектную магутнасць Саяна-Шушанская магутнасцю 6,3 млн кВт.

Выкарыстоўваецца энергія горных рэк. У Таджыкістане на рацэ Вахшы дзейнічае Рагунская ГЭС магутнасцю 3,6 млн кВт з напорнай плацінай у 230 м. У цяперашні час уводзяцца новыя магутнасці на ГЭС Паўночнага Каўказа, Закаўказзя, Сярэдняй

Азіі і Далёкага Усходу. Гідраэлектрастанцыі з'яўляюцца аднаўляемымі крыніцамі энергіі і даюць танную энергію, аднак іх будаўніцтва патрабуе вялікіх капіталаўкладанняў і працяглага тэрміну выканання. Акрамя гэтага, пры пабудове ГЭС на рэках са спусцістымі берагамі затапліваюцца вялікія плошчы ўрадлівых зямель і лясных масіваў, пагаршаецца экалогія краю. Заслугоўвае ўвагі выкарыстанне ў будучым энергіі марскіх прыліваў і адліваў. Першая прылiўная ГЭС была пабудована ў СССР у 1968 г. у Кіслагубскай губе Баранцава мора (Кіслагубская ГЭС магутнасцю 400 кВт). Праектуецца будаўніцтва магутных прылiўных электрастанцый ў Мезанскай губе Белага мора пра розніцы ўзроўняў вады 10 м.

Магутнай і перспектыўнай крыніцай электраэнергіі з'яўляецца атамная энергетыка. Першая ў свеце атамная электрастанцыя (АЭС) была пабудавана ў СССР у 1954 г. У цяперашні час высокага ўзроўню дасягнула атамная энергетыка ў капіталістычных краінах. У Францыі выпрацоўка электраэнергіі на АЭС складае больш за 70 % ад усёй электраэнергіі, у ФРГ — 50 %, у Японіі — 20 %, у Англіі — 17 %, у ЗША — 14 %. У СНД на ЦЭС выпрацоўваецца 75,3 % электраэнергіі, на ГЭС — 13,9 %, на АЭС — 10,8 %. Цяпер у свеце працуе 416 атамных энергаблокаў і 108 знаходзяцца ў стане будаўніцтва.

Для бяспекі і надзейнасці выкарыстання ядзернай энергетыкі ў маі 1989 г. была створана Сусветная асацыяцыя арганізацый, эксплуатуючых атамныя станцыі, — САА АЭС, якая арганізоўвае ўзаемны абмен інфармацыяй аб эксплуатацыі АЭС. Групы экспертаў САА маюць права бесперашкодна наведваць любую АЭС свету. Гэта дае магчымасць павысіць бяспечнасць да ўзроўню, дасягнутага на лепшых АЭС свету. Пошукі новых крыніц энергіі прывялі вучоных СНД да стварэння рэактараў тэрмаядзернага сінтэзу «Токамак-10». Цяпер ужо атрымана тэмпература плазмы 90 млн градусаў, што з'яўляецца неабходнай умовай тэрмаядзернай рэакцыі. Па ініцыятыве МАГАТЭ аб'яднаны намаганні вучоных СНД, ЗША, Японіі і краін Еўропы для стварэння інтэрнацыянальнага токамака «Інтэр». Стварэнне рэактара «Інтэр» адкрые невычарпальную крыніцу энергіі. Палівам для такіх рэактараў з'яўляецца дэйтэрый, які знаходзіцца ў вадзе акіянаў. Энергія дэйтэрыю ў адным літры вады эквівалентная 300 л бензіну.

Заслугоўваюць увагі аднаўляльныя крыніцы энергіі, напрыклад вецер і сонца. Гэта танныя і экалагічна чыстыя крыніцы энергіі. Ветраэлектрастанцыі пераўтвараюць энергію ветру ў электрычную і могуць будавацца ў сельскіх раёнах Казахстана і Сярэдняй Азіі з устойлівымі вятрамі. Геліястанцыі пераўтвараюць сонечную

энергію ў электрычную і могуць будавацца ў паўднёвых раёнах СНД.

СНД займае велізарную тэрыторыю, і перадача электраэнергіі ад крыніцы ў прамысловыя раёны мае вялікае эканамічнае значэнне. У СНД гістарычна склаліся дзве сістэмы напружання электрычных сетак. Напружанні 110—220—500 кВ дзейнічаюць у аб'яднаных электраэнергетычных сістэмах (АЭЭС) Цэнтра, Сярэдняй Волгі, Урала, Казахстана, Сібіры, Сярэдняй Азіі і Далёкага Усходу. Напружанні 110(150)—330—750 кВ дзейнічаюць у АЭЭС Поўдня, Паўночнага Захаду і ў заходняй частцы АЭЭС Цэнтра. Для аб'яднання ЭЭС у адзіную электраэнергетычную сістэму (АЭЭС) СНД устанаўліваюцца ЛЭП высокага напружання 1150 кВ для пераменнага току і 1500 кВ для пастаяннага току. Яны звяжуць еўрапейскую секцыю АЭЭС з АЭЭС Урала, Паўночнага Казахстана і Сібіры, а таксама АЭЭС Сібіры і АЭЭС Сярэдняй Азіі і Усходу. Уступіла ў строй магутная міжсістэмная электрычная сувязь напружаннем 1 150 кВ пераменнага току Урал—Экібастуз—Сібір і ўведзена ў эксплуатацыю высакавольтная лінія напружаннем 1500 кВ пастаяннага току Экібастуз—Цэнтр.

1

ЭЛЕКТРЫЧНЫ ЛАНЦУГ АДНАФАЗНАГА ПЕРАМЕННАГА ТОКУ

1.1. Аднафазны пераменны ток

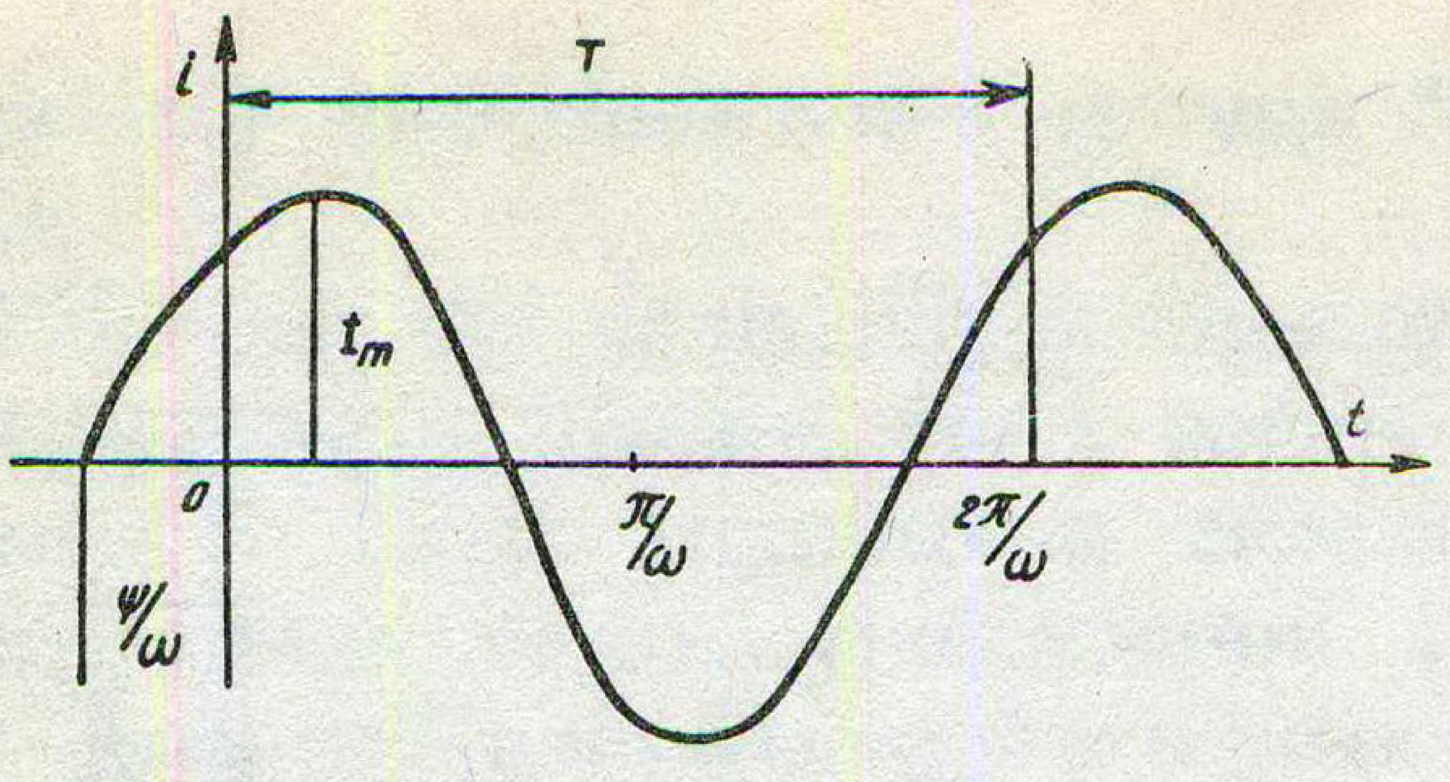
Ток, які змяняецца па значэнні напрамку, называецца *пераменным токам.* Уяўленне пра пераменны ток можна атрымаць, калі павольна вярцець ручку мадэлі генератара, падключанай да гальванометра. Адхіленне стрэлкі гальванометра то ўправа, то ўлева сведчыць аб перыядычным змяненні значэння і напрамку току ў ланцугу, аб пераменным току. Пераменны ток, які выкарыстоўваецца ў вытворчасці і быце, змяняецца па сінусоідным законе:

$$i = I_m \sin((2\pi/T)\,t + \psi) = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

Значэнне пераменнага току i у дадзены момант часу t называецца *імгненным значэннем пераменнага току.* Графік пераменнага току паказаны на рыс. 1.1. Для дэманстрацыі сінусоіднага змянення пераменнага току сеткі трэба рэастат падключыць у сетку як патэнцыёметр. Напружанне з рэастата падаецца на вертыкальна адхіляльныя пласціны электроннага асцылографа. На экране асцылографа будзе бачна сінусоіда, якая сведчыць аб сінусоідных змяненнях напружання на гарызантальных абкладках кандэнсатара асцылографа, току ў рэастаце і напружання ў сетцы.

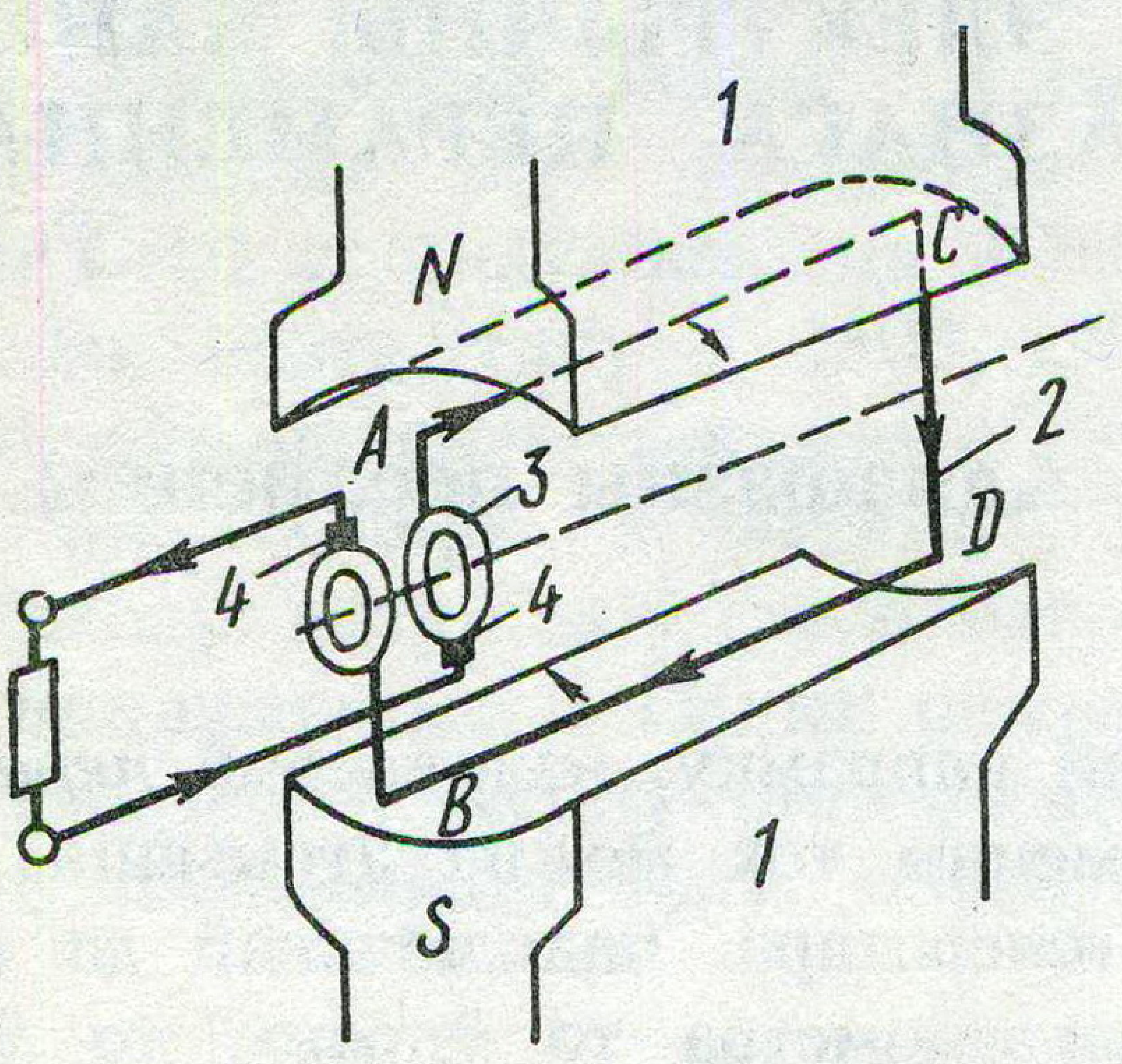
Крыніцай пераменнага току з'яўляюцца генератары пераменнага току. Разгледзім устройства самага простага. Генератар складаецца са статара *1,* ротара *2,* кантактных кольцаў *3* і шчотак *4* (рыс. 1.2). Статар уяўляе сабой магніт і служыць для стварэння магнітнага поля, ротар — рамку *ACDB* ізаляванага провада, замацаваную на восі. Пры вярчэнні ў магнітным полі статара ў рамцы будзе ўзбуджацца ЭРС, пераменлівая па значэнні і напрамку — пера-

2. Зак 5287



Рыс. 1.1. Графік пераменнага току

менная ЭРС. Сінусоіднае змяненне пераменнага току забяспечваецца канструктарскімі асаблівасцямі генератара — размяшчэннем абмоткі і формай полюсаў электрамагнітаў. У сучасных генератарах пераменнага току абмотка знаходзіцца ў пазах статара. Ротар уяўляе сабой магутны электрамагніт з полюсамі, якія чаргуюцца.



Рыс. 1.2. Схема прасцейшага генератара пераменнага току

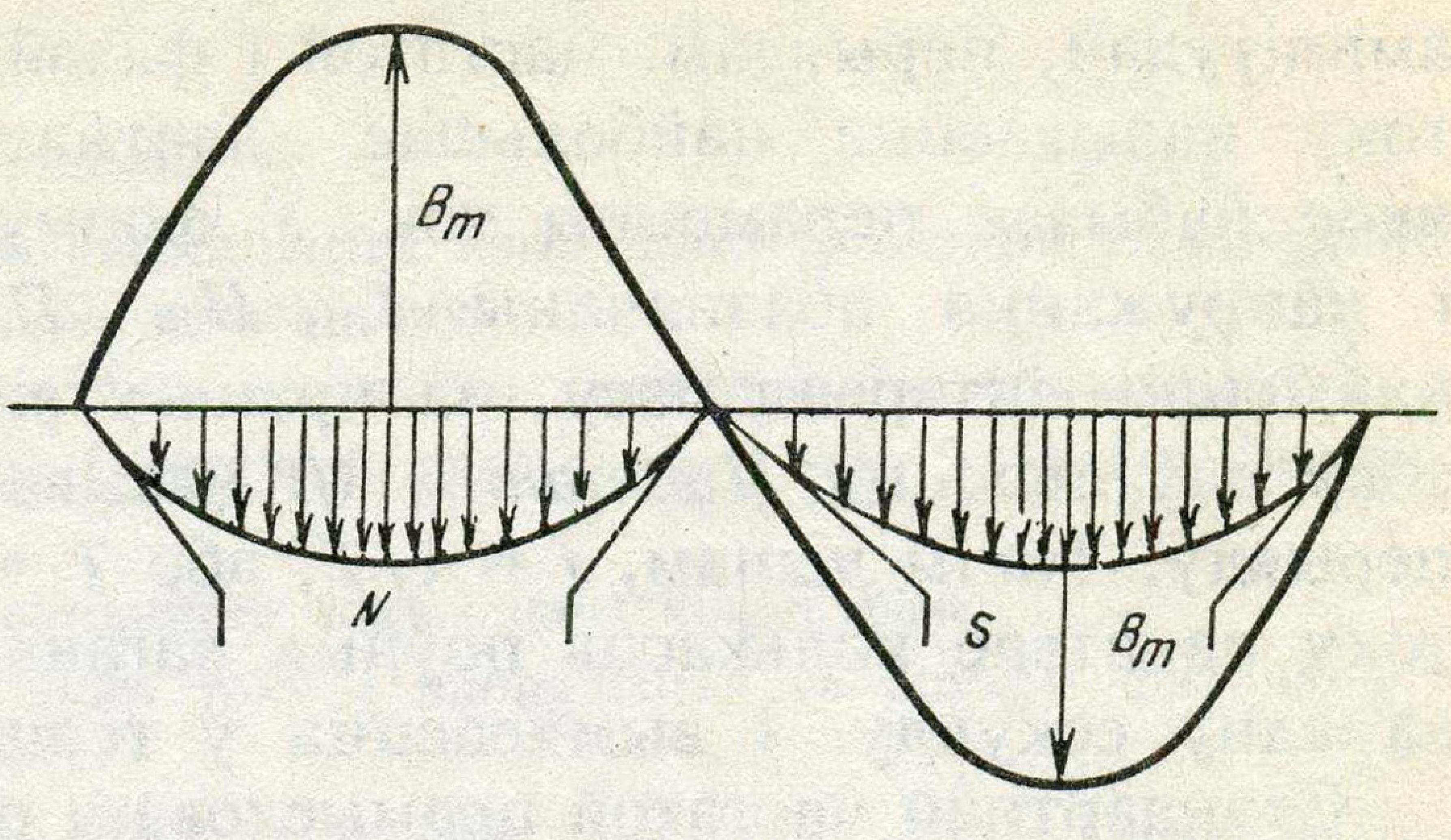
Наканечнікі полюсаў электрамагнітаў маюць такую форму, пры якой у зазоры паміж статарам і ротарам магнітная індукцыя па акружнасці змяняецца па сінусоідным законе $B = B_m \sin \beta$.

Калі мысленна разгарнуць ротар па прамой, то атрымаецца карціна сінусоіднага размеркавання магнітнай індукцыі ўздоўж паветранага зазору (рыс. 1.3). Пры вярчэнні ў абмотках статара ўзбуджаецца ЭРС індукцыі $e = Blv \sin \alpha$. Для генератара з вярчальным электрамагнітам магнітная індукцыя $B = B_m \sin \beta$, дзе $\beta = \omega t$. Такім чынам, вугал павароту ротара адносна выбранага напрамку вызначаецца здабыткам вуглавой частаты ω і часу t; $\sin \alpha = 1$, бо лініі магнітнай індукцыі поля ротара перасякаюць праваднікі абмоткі статара пад прамым вуглом. Формула ЭРС індукцыі будзе мець выгляд: $e = B_m lv \sin \omega t$. Значэнні B_m, l і v пастаянныя для дадзенага генератара, іх здабытак называецца *амплітудай ЭРС*. Такім чынам, $e = E_m \sin \omega t$.

Пры падключэнні да генератара, у якім ЭРС змяняецца па сінусоідным законе, супраціўлення ў ім паявіцца пераменны ток, які таксама будзе змяняцца па сінусоідным законе.

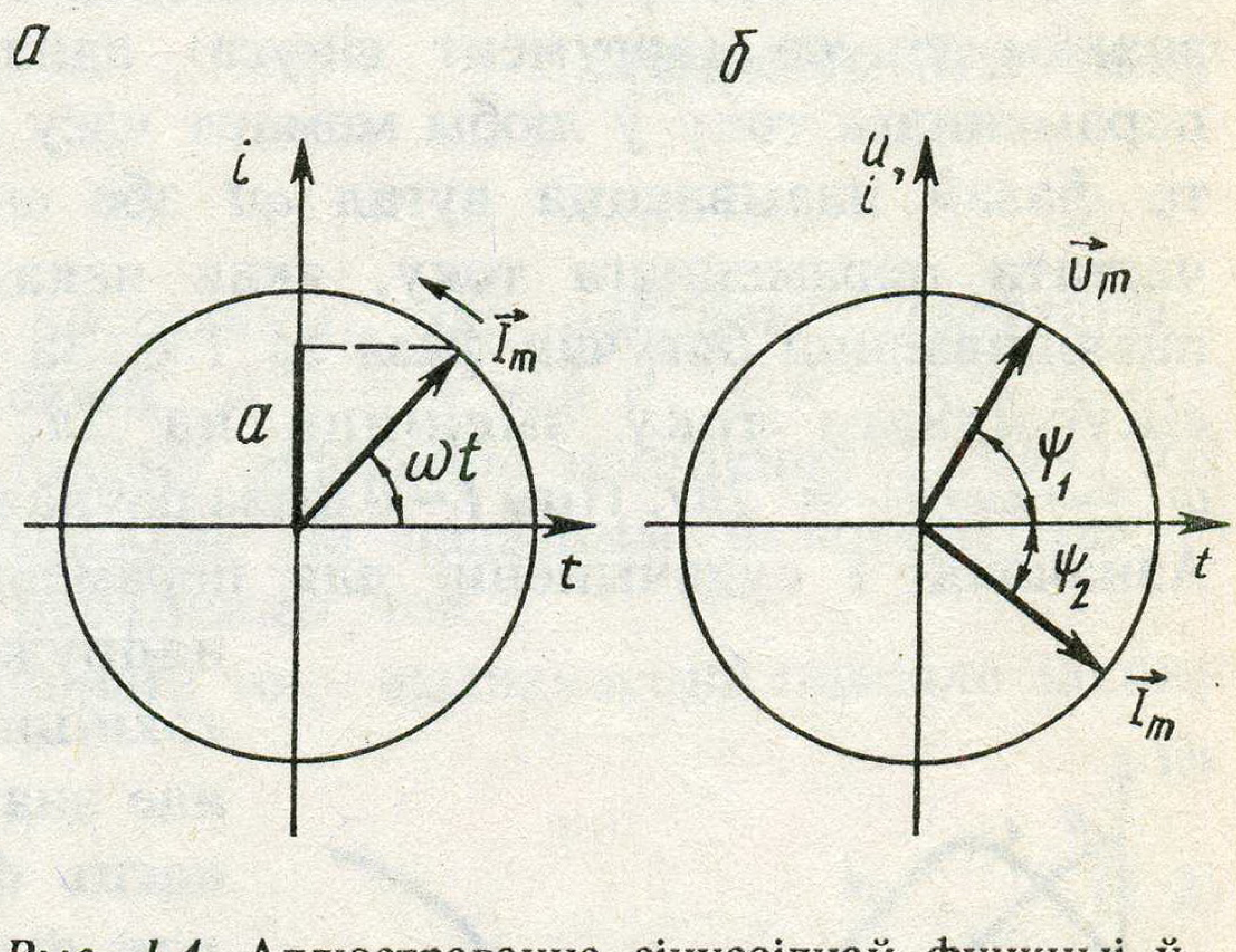
Пераменны сінусоідны ток мае шэраг пераваг у параўнанні з пастаянным. Яго можна трансфармаваць, а ток высокага напружання перадаваць на вялікія адлегласці. Электрычныя машыны пераменнага току простыя па канструкцыі і параўнальна танныя. Пры сінусоідным змяненні току, ЭРС і напружання метад разліку

электрычных ланцугоў спрашчаецца. Сума ці рознасць, вытворная ці інтэграл сінусоіднай велічыні ёсць таксама сінусоідная велічыня.



Рыс. 1.3. Графік змянення магнітнай індукцыі ў зазоры паміж ротарам і статарам

Пераменны ток, як усякую сінусоідную велічыню, можна прадставіць у выглядзе вектара, роўнага па модулю амплітудзе, які круціцца з вуглавой частатой ω у напрамку, процілеглым напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі (рыс. 1.4 *а*). Сапраўды, праекцыя вярчальнага вектара на вось ардынаты зміняецца па сінусоідным законе ($i = I_m \sin \omega t$) аналагічна пераменнаму току. Матэматычныя дзеянні над праекцыямі вектараў прыводзяць да тых жа вынікаў, што і матэматычныя дзеянні над самімі вектарамі.



Рыс. 1.4. Адлюстраванне сінусоіднай функцыі ў выглядзе самавярчальнага вектара

Аналагічна вектарамі могуць быць прадстаўлены ЭРС і напружанне. Пры гэтым трэба мець на ўвазе, што вектары току (ЭРС, напружання) з'яўляюцца графічным выразам гэтых велічынь, у адрозненне ад вектараў сілы, напружанасці поля і велічынь, якія маюць фізічны сэнс.

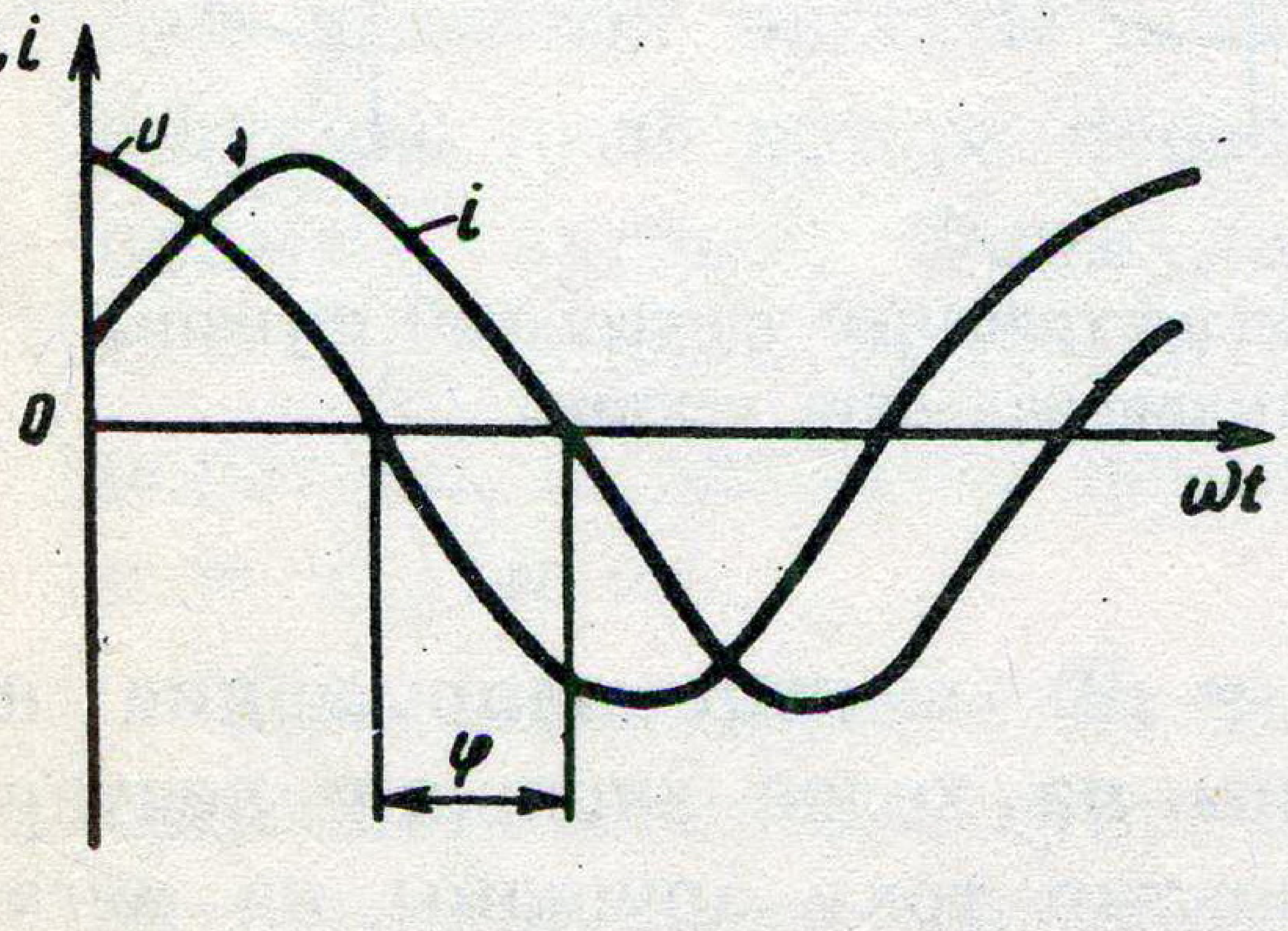
Калі ў пачатковы момант ($t = 0$) вектар напружання не супадае з воссю абсцыс, а зрушаны па ходзе вярчэння вектара на вугал ψ_1 (дадатны вугал), а вектар току зрушаны на вугал ψ_2 супраць вярчэння вектара (адмоўны вугал) (рыс. 1.4 *б*), то формулы пераменнага напружання і току будуць мець выгляд:

$$\left.\begin{aligned} u &= U_m \sin(\omega t + \psi_1); \\ i &= I_m \sin(\omega t - \psi_2). \end{aligned}\right\} \qquad (1.1)$$

Пераменны ток характарызуецца наступнымі параметрамі: амплітудай, перыядам, частатой і фазай. *Амплітудай* пераменнага току называецца найбольшае дадатнае або адмоўнае значэнне, якое набывае пераменны ток. У формулах (1.1) амплітуды току і напружання абазначаны I_m, U_m. *Перыядам (T)* называецца найменшы інтэрвал часу, на працягу якога значэнне пераменнага току паўтараецца. *Частатой* (f) называецца велічыня, адваротная перыяду. Такім чынам, $f = 1/T$, або $T = 1/f$. Частата пераменнага току паказвае колькасць поўных ваганняў току, якія адбываюцца за адну секунду, і вымяраецца ў герцах.

Стандартнай частатой прамысловага пераменнага току ў краінах СНД і Еўропе з'яўляецца частата 50 Гц, у ЗША і Японіі — 60 Гц. Токі павышанай частаты (10^2—10^3 Гц) прымяняюцца ў металургіі і металаапрацоўцы. У сувязі выкарыстоўваюцца токі гукавай частаты ў дыяпазоне $3 \cdot 10^2$—$5 \cdot 10^4$ Гц, у радыётэхніцы, тэлебачанні і тэлекіраванні — у дыяпазоне $1 \cdot 10^5$—$4 \cdot 10^{14}$ Гц.

Ф а з а паказвае імгненнае значэнне пераменнага току пры пэўнай амплітудзе ў дадзены момант часу. Паколькі вугал пад знакам сінуса (аргумент сінуса) адназначна вызначае значэнне пераменнага току ў любы момант часу пры зададзенай амплітудзе, то фазай называецца вугал ωt або $\omega t + \psi$, дзе ω — вуглавая частата пераменнага току, якая паказвае лік радыянаў, на які павялічваецца бягучая фаза за 1 с. За час T аднаго перыяду фаза сінусоіднага току зменіцца на 2π, значыць, $\omega T = 2\pi$ або $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$. Пры $t = 0$ фаза роўная ψ і называецца пачатковай. Азначэнні і судачыненні для пераменнага току сапраўдныя для напружання і ЭРС. У электратэхніцы звычайна мае практычнае значэнне не сама фаза, а розніца фаз, якая называецца *зрухам фаз*. Зрух фаз паміж напружаннем $u = U_m \sin(\omega t + \psi_1)$ і токам $i = I_m \sin(\omega t + \psi_2)$ роўны рознасці фаз $\varphi = \omega t + \psi_1 - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2$. Зрух фаз паміж токам і напружаннем можна ўстанавіць па іх графіках шляхам параўнання стану велічынь у пунктах з аднолькавымі фазамі (рыс. 1.5). У далейшым пры пабудове графікаў на восі абсцыс будзем адкладваць не час t, а велічыню, прапарцыйную часу, ωt.



Рыс. 1.5. Графік пераменнага току і напружання са зрухам фаз

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Які ток называецца пераменным?

2. Запішыце формулу для вызначэння імгненнага значэння пераменнага сінусоіднага току і начарціце графік гэтага току.

3. Якое значэнне пераменнага току называецца імгненным? Амплітудным?

4. Што называецца перыядам і частатой пераменнага току і як яны звязаны паміж сабою?

5. Дайце азначэнне фазы пераменнага току і пачатковай фазы.

6. Начарціце графік пераменнага току і напружання са зрухам фаз на $\varphi = 0{,}5\pi$ рад.

7. Чаму роўная вуглавая частата ω пераменнага току пры частаце 50 і 100 Гц?

Адказ: $\omega_1 = 314{,}16$ рад/с; $\omega_2 = 628{,}32$ рад/с.

8. Вызначце зрух фаз паміж токам і напружаннем, калі амплітуднае значэнне току спазняецца на $1/4\ T$.

Адказ: $\varphi = 0{,}5\pi$ рад.

1.2. Дзейнае і сярэдняе значэнні пераменнага току

Пераменны ток, як і пастаянны, мае цеплавыя, светлавыя, механічныя і хімічныя дзеянні. Дзейнае значэнне пераменнага току роўнае такому значэнню пастаяннага току, які за час аднаго перыяду выдзяляе на дадзеным рэзістары такую колькасць цеплаты, як і пераменны ток.

Цеплавое дзеянне пастаяннага току вызначаецца паводле закону Джоўля—Ленца:

$$Q = I^2 rT, \tag{1.2}$$

дзе T — час, роўны аднаму перыяду пераменнага току.

Такую колькасць цеплаты ў дадзеным рэзістары за гэты час выдзеліць і пераменны ток:

$$Q = \int_0^T i^2 r dt. \tag{1.3}$$

Параўнаем формулы (1.2) і (1.3) і атрымаем $I^2 rT = \int_0^T i^2 r dt.$

Такім чынам, дзейнае значэнне пераменнага току з'яўляецца ся-

рэднім квадратычным значэннем пераменнага току за перыяд T. У выпадку пераменнага сінусоіднага току

$$I = \sqrt{1/T \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{1/T \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} =$$

$$= \sqrt{1/T \int_0^T I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_m.$$

Дзейнае значэнне пераменнага току з'яўляецца пастаяннай велічынёй для дадзенага току і роўнае амплітуднаму значэнню пераменнага току, падзеленаму на $\sqrt{2}$. Дзейныя значэнні току, ЭРС і напружання абазначаюцца вялікімі літарамі лацінскага алфавіта без індэксаў.

Усе азначэнні і судачыненні дзейнага значэння пераменнага току сапраўдныя таксама для пераменнага напружання і ЭРС. Амперметры і вальтметры пры вымярэнні пераменных токаў і напружанняў паказваюць іх дзейныя значэнні.

Пры разліках выпрамнікаў і электрычных машын прыходзіцца мець справу з сярэднім значэннем пераменнага току. Для пераменнага току, які змяняецца па сінусоідным законе, сярэдняе значэнне за цэлы лік перыядаў роўнае нулю. Сярэдняе значэнне сінусоіднага току (напружання, ЭРС) вызначаецца за палавіну перыяду. Сярэднім значэннем пераменнага току (напружання, ЭРС) з'яўляецца сярэдняе ўсіх імгненных значэнняў току (напружання, ЭРС) за дадатны паўперыяд.

Вызначым сярэдняе значэнне сінусоіднага току:

$$I_c = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i dt = 2/T \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt =$$

$$= -(2I_m / T\omega) \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = 2I_m/\pi = 0{,}637 I_m.$$

Аналагічна вызначаецца сярэдняе значэнне сінусоіднага пераменнага напружання і ЭРС.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца дзейным значэннем пераменнага току?
2. Якая розніца паміж сярэднім і дзейным значэннямі пераменнага току?
3. Стандартныя напружанні сеткі пераменнага току 127, 220 і 380 В. Чаму роўныя іх амплітудныя значэнні?

Адказ: 179,6; 311,1; 537,4 В.

4. Вальтметр, падключаны ў ланцуг пераменнага току, паказвае напружанне $U = 220$ В, а амперметр — ток $I = 5$ А. Чаму роўныя амплітудныя значэнні напружання і току?

А д к а з: $U_m = 311{,}1$ В, $I_m = 7{,}07$ А.

5. Пры якім фазным вугле імгненнае значэнне пераменнага току будзе роўнае дзейнаму значэнню пераменнага току?

А д к а з: $\omega t = \pi/4$ рад.

6. У сетку пераменнага току ўключаны паралельна два прымальнікі. Чаму роўны ток у сетцы, калі токі ў прымальніках $I = 5$ А у кожным, а зрух фаз паміж імі $\varphi = 40^\circ$?

А д к а з: $I = 9{,}4$ А.

7. У сетку пераменнага току з напружаннем $U = 220$ В уключаны паслядоўна два прымальнікі з роўнымі супраціўленнямі. Чаму роўныя напружанні на прымальніках, калі рознасць фаз паміж імі $\varphi = 60$ °С?

А д к а з: $U = 127$ В.

1.3. Выраз фізічных велічынь комплекснымі лікамі

Любы пункт $(a,\ b)$ на комплекснай плоскасці выражаецца комплексным лікам $\dot{A} = a + jb$, дзе a — рэчаісная частка комплекснага ліку; jb — уяўная частка комплекснага ліку. Даўжыня вектара, які злучае пачатак восяў каардынат з пунктам на плоскасці $(A = \sqrt{a^2 + b^2})$, называецца *модулем комплекснага ліку.* Вугал павароту вектара адносна рэчаіснай восі $\alpha = \operatorname{arctg} b/a$ і называецца *аргументам комплекснага ліку.* Комплексныя лікі могуць быць выражаны ў алгебраічнай, трыганаметрычнай і паказальнай формах:

$$\dot{A} = a + jb = A(\cos\alpha + j\sin\alpha) = Ae^{j\alpha}.$$

Множанне вектара на j адпавядае павароту яго адносна рэчаіснай восі ў дадатным напрамку на 90°. Сапраўды,

$$Ae^{j\alpha}e^{j\,90^\circ} = Ae^{j(\alpha+90^\circ)} =$$

$$= A(\cos\alpha + j\sin\alpha)(\cos 90^\circ + j\sin 90^\circ) = jAe^{j\alpha}.$$

Множанне вектара на $-j$ адпавядае павароту яго адносна рэчаіснай восі ў адмоўным напрамку на 90°.

Множанне вектара на -1 адпавядае павароту яго адносна рэчаіснай восі ў дадатным ці адмоўным напрамку на 180°:

$$e^{\pm j180^\circ} = \cos 180^\circ \pm j \sin 180^\circ = -1.$$

Множанне вектара на 1 адпавядае павароту яго адносна рэчаіснай восі ў дадатным ці адмоўным напрамку на 360°:

$$e^{\pm j\,360^\circ} = \cos 360^\circ \pm j \sin 360^\circ = 1.$$

Комплексныя лікі A і A^*, якія адрозніваюцца толькі знакам уяўнай часткі (знакам аргумента), называюцца *спалучанымі*:

$$\dot{A} = a + jb = A(\cos\alpha + j\sin\alpha) = Ae^{j\alpha};$$

$$A^* = a - jb = A(\cos\alpha - j\sin\alpha) = Ae^{-j\alpha}.$$

Пры складанні (адыманні) комплексных лікаў асобна складваюцца (адымаюцца) іх рэчаісныя і ўяўныя часткі:

$$(a + jb) \pm (c + d) = (a \pm c) + j(b \pm d).$$

Множанне комплексных лікаў выконваецца па правілу множання мнагачленаў з улікам знака ўяўнай адзінкі (j):

$$(a + jb)(c + jd) = (ac - bd) + j(ad + bc).$$

Больш зручна выконваць множанне комплексных лікаў, якія выражаны ў паказальнай форме. Пры гэтым модуль здабытку роўны здабытку модуляў сумножнікаў, а аргумент здабытку роўны суме аргументаў сумножнікаў:

$$Ae^{j\alpha} \cdot Be^{j\beta} = ABe^{j(\alpha+\beta)}.$$

Пры дзяленні комплексных лікаў патрэбна дзеліва і дзельнік памножыць на спалучаны дзельніку комплексны лік і выканаць дзяленне па правілу дзялення мнагачлена на рэчаісны лік:

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{(ac + bd) + j(bc - ad)}{c^2 + d^2}.$$

Больш зручна выконваць дзяленне комплексных лікаў, якія выражаны ў паказальнай форме. Пры гэтым модуль дзелі роўны дзелі ад дзялення модуля дзеліва на модуль дзельніка, а аргумент дзелі роўны рознасці аргументаў дзеліва і дзельніка:

$$Ae^{j\alpha}/Be^{j\beta} = (A/B)\,e^{j(\alpha-\beta)}.$$

Кожнаму комплекснаму ліку $\dot{A} = Ae^{j\alpha}$ на комплекснай плоскасці адпавядае адзін пункт і адзін вектар $\dot{A}$, праведзены з пачатку каардынат у гэты пункт. Калі з часам павялічваць аргумент α, то вектар $\dot{A}$ будзе вярцецца ў напрамку супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі, а канец вектара будзе апісваць на комплекснай плоскасці акружнасць. Калі велічыні пераменнага току выражаны гарманічнымі функцыямі і прадстаўлены вектарамі, якія верцяцца супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі з вуглавой частатой ω, то гэтыя велічыні пераменнага току можна выразіць комплекснымі лікамі $\dot{A} = Ae^{j\omega t}$, дзе $\omega t = \alpha$.

Комплексныя велічыні прынята абазначаць вялікай літарай з кропкай, а комплексныя велічыні, якія не залежаць ад часу (супраціўленне, праводнасць), — вялікай літарай без кропкі.

Запішам у комплексным выглядзе некаторыя фізічныя велічыні. Імгненнае напружанне $u = U_m \cos(\omega t + \psi_u)$ графічна можна прадставіць вектарам U_m, які верціцца супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі з вуглавой частатой ω. Вектар з модулем U_m і аргументам $\omega t + \psi_u$ сімвалічна выражаецца ў паказальнай форме $\dot{U}_m = U_m e^{j(\omega t + \psi_u)}$. Аргумент ωt аднолькавы для усіх велічынь пераменнага току адной частаты, таму ў комплексным выражэнні гэтых велічынь яго апускаюць. У гэтым выпадку разглядаюцца ўжо нерухомыя вектары. Сімвалічны выраз вектара амплітуды напружання запішацца ў выглядзе $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}$. Модулем комплекснага напружання зручна браць не амплітуднае, а дзейнае значэнне:

$$\dot{U} = Ue^{j\psi_u} = U(\cos\psi_u + j\sin\psi_u).$$

Аналагічна для пераменнага току

$$\dot{I} = Ie^{j\psi_i} = I(\cos\psi_i + j\sin\psi_i).$$

Комплексным супраціўленнем Z ланцуга называецца стасунак комплекснага напружання да комплекснага току:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} =$$

$$= ze^{j\varphi} = z\cos\varphi + jz\sin\varphi = r + jx,$$

дзе $\psi_u - \psi_i = \varphi$ — зрух фаз паміж токам і напружаннем.

Рэчаісная частка комплекснага супраціўлення з'яўляецца актыўным супраціўленнем, а ўяўная — рэактыўным.

Пры прымяненні комплекснага метаду разлік электрычных ланцугоў пераменнага току спрашчаецца, формулы разліку ланцугоў пераменнага току аналагічныя формулам разліку ланцугоў пастаяннага току.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як запісваецца комплексны лік у алгебраічнай, трыганаметрычнай і паказальнай формах?

2. Што называецца модулем комплекснага ліку? Аргументам комплекснага ліку?

3. Як запісаць комплексны ток $I = 8 - j6$ A у трыганаметрычнай і паказальнай формах?

А д к а з: $\dot{I} = 10\ (\cos 36{,}87^\circ\ - j \sin 36{,}87^\circ)$ A; $\dot{I} = 10 e^{-j36{,}87^\circ}$ A.

4. Як запісаць комплексны ток $\dot{I} = 10e^{j30^\circ}$ у трыганаметрычнай і алгебраічнай формах?

А д к а з: $\dot{I} = 10\ (\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ)$A; $\dot{I} = 8{,}66 + j5$ A.

5. Вызначце актыўнае і рэактыўнае супраціўленні ланцуга, калі комплекснае супраціўленне ланцуга $Z = 100e^{j60^\circ}$ Ом.

А д к а з: $r = 50$ Ом; $jx = 86{,}6$ Ом.

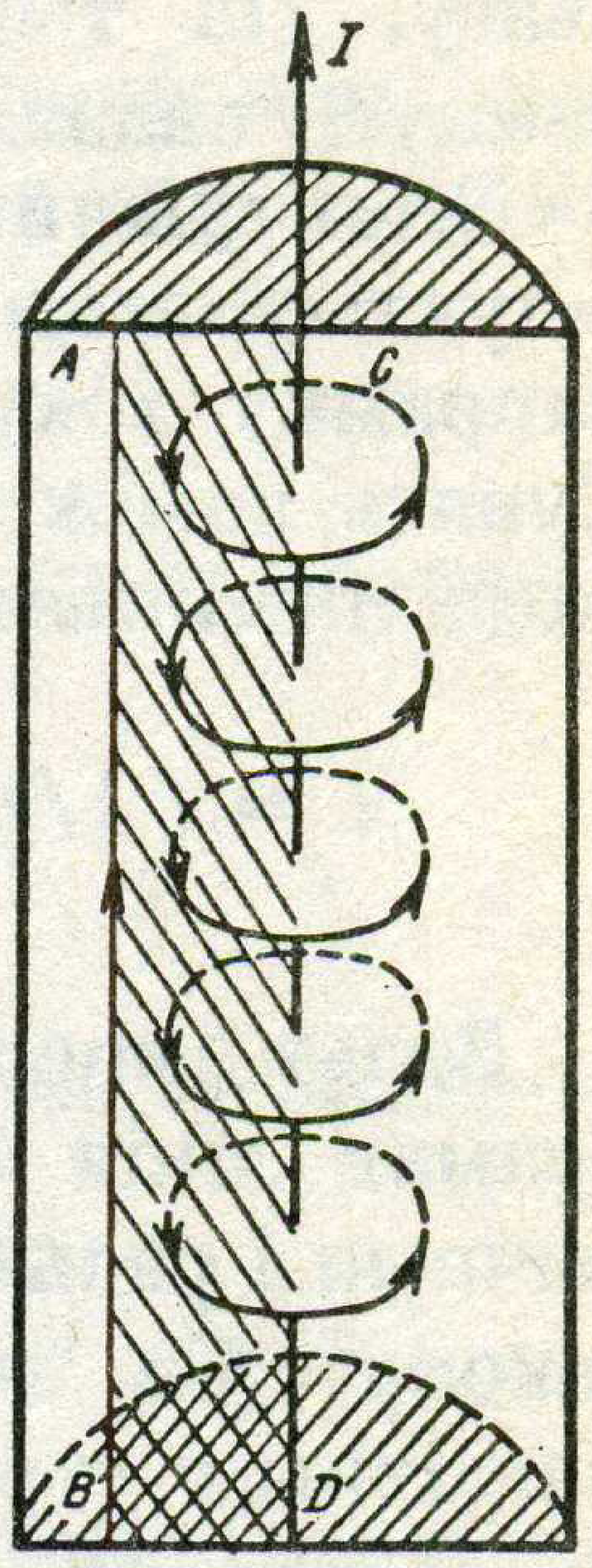
1.4. Класіфікацыя электрычных ланцугоў пераменнага току

Электрычны ланцуг складаецца з крыніцы току і прымальніка электрычнай энергіі, апаратаў кіравання, вымяральных прыбораў і злучальных правадоў. Крыніцамі электрычнай энергіі ў ланцугах пераменнага току з'яўляюцца генератары пераменнага току, прымальнікамі — рэзістары, катушкі індуктыўнасці і кандэнсатары. *Рэзістарам* называецца электратэхнічнае ўстройства, якое мае супраціўленне электрычнаму току. Рэгулюемы рэзістар называецца *рэастатам.* Электратэхнічныя ўстройствы, якія маюць уласцівасць рэзістара, называюцца *рэзістыўнымі элементамі электрычнага ланцуга.* Рэзістыўныя элементы валодаюць рознымі супраціўленнямі ў ланцугах пастаяннага і пераменнага току. У ланцугах пастаяннага току іх супраціўленне называецца *амічным,* а ў ланцугах пераменнага току — *актыўным.*

Актыўнае супраціўленне рэзістыўнага элемента крыху большае, чым амічнае. Супраціўленне рэзістыўнага элемента вылічаецца па формуле $R = \rho\, l/S$. У ланцугах пастаяннага току электроны рухаюцца паступальна (дрэйфуюць) па ўсёй плошчы папярочнага

сячэння правадніка, а ў ланцугу пераменнага току з-за паверхневага эфекту (скін-эфекту) электроны пры сваім руху выціскаюцца да паверхневага слою. Такім чынам, плошча папярочнага сячэння правадніка для руху электронаў памяншаецца, што прыводзіць да павелічэння супраціўлення правадніка.

Разгледзім фізічную сутнасць скін-эфекту. Прычынай скін-эфекту з'яўляецца электронная праводнасць металаў, якая садзейнічае пранікненню электрамагнітнага поля ўнутр правадніка. Возьмем круглы праваднік, зробім падоўжнае сячэнне і мысленна выдзелім контур *ABDC* (рыс. 1.6). Няхай ў пэўны момант пераменны ток накіраваны ўверх і нарастае. Выдзелім частку току па восі правадніка. Створанае ім магнітнае поле будзе пранізваць контур. Пераменнае магнітнае поле па законе электрамагнітнай індукцыі ўзбуджае ў контуры *ABDC* ЭРС індукцыі ($E = -k\,(d\Phi/dt)$) і індукцыйны ток, які на перыферыйнай частцы *AB* контура будзе супадаць па напрамку з токам у правадніку, а на восевай частцы *CD* контура мець процілеглы напрамак. Напрамак індукцыйнага току ў контуры вызначаецца па правілу Ленца. Пры змяненні напрамку пераменнага току ў правадніку змяняецца напрамак індукцыйнага току ў контуры, і на перыферыі правадніка ток па-ранейшаму ўзмацніцца, а на восевай частцы контура паслабіцца. Індукцыйны ток у контуры залежыць ад магнітнага патоку і хуткасці яго змянення. Такім чынам, чым большы дыяметр правадніка, тым больш прыкметна праяўляецца паверхневы эфект. Напрыклад, супраціўленне меднага проваду дыяметрам 2 см пераменнаму току частатой 50 Гц узрастае ў параўнанні з супраціўленнем пастаяннаму току на 3 %, а для проваду дыяметрам 2 мм — толькі на 0,0003 %. Для токаў з частатой $f = 10^5$ Гц супраціўленне проваду пераменнаму току павялічваецца амаль у 7 разоў.



Рыс. 1.6. Схема для тлумачэння з'явы скін-эфекту

У рэзістыўных элементах электрычная энергія з карысцю пераўтвараецца ва ўнутраную або рассейваецца ў выглядзе цеплавой. Электрычныя лямпы, электрапечы, электрапрасы і другія награвальныя прыборы пры прамысловай частаце электрычнага току практычна маюць толькі актыўнае супраціўленне, такім чынам, з'яўляюцца рэзістыўнымі элементамі ланцуга. Індуктыўнае і ёмістаснае супраціўленне рэзістыўных элементаў у ланцугах пераменнага току нізкай частаты не прымаецца пад увагу.

Рэальныя індуктыўныя элементы ланцуга маюць індуктыўнае і актыўнае супраціўленні. У электрарухавіках электрычная энергія

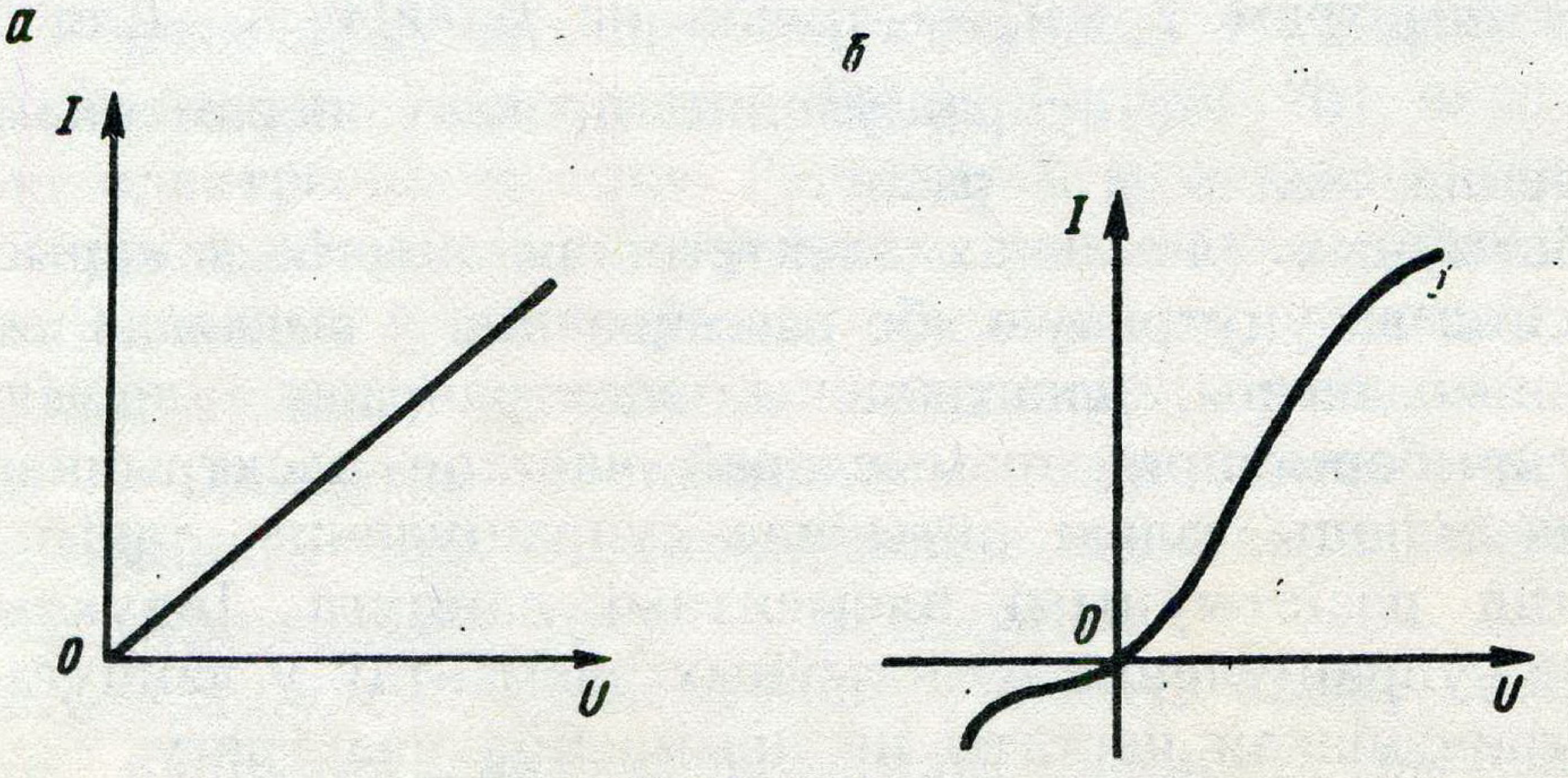
ператвараецца ў механічную і цеплавую (электрарухавік награваецца). У ёмістасных элементах ланцуга таксама маюцца невялікія страты электраэнергіі. Актыўнае супраціўленне ёмістасных элементаў ланцуга нязначнае і на практыцы яно не прымаецца пад увагу. Па тыпу элементаў, уключаных у ланцуг, электрычныя ланцугі падзяляюцца на лінейныя і нелінейныя.

Электрычныя ланцугі, у якіх электрычнае супраціўленне, індуктыўнасць і электрычная ёмістасць не залежаць ад значэння і напрамку току і напружання ў ланцугу, называюцца *лінейнымі.* Сувязь паміж токам і напружаннем у лінейных ланцугах выражаецца лінейнымі алгебраічнымі або дыферэнцыяльнымі раўнаннямі:

$$i = (1/r)\,u = gu;\; u_L = -e_L = L\,(di/dt)\,;\; i = C\,(du/dt)\,.$$

Вольт-ампернай характарыстыкай лінейнага элемента з'яўляецца прамая лінія (рыс. 1.7, *а*). Дакладней кажучы, рэальныя электрычныя і радыётэхнічныя ланцугі не падпарадкоўваюцца лінейнаму закону. Са змяненнем току ў індуктыўнай катушцы з ферамагнітным стрыжнем індуктыўнасць L не застаецца пастаяннай, не застаецца пастаяннай і ёмістасць C кандэнсатара з дыэлектрыкам пры змяненні напружання. Супраціўленне ўсіх прыёмнікаў у той або іншай меры залежыць ад сілы току. Супраціўленне металічных праваднікоў пры павелічэнні току павялічваецца, а электралітаў — памяншаецца. Супраціўленне паўправаднікоў і дыэлектрыкаў таксама змяняецца пры змяненні сілы току. Але, улічваючы, што гэтыя змяненні малыя, электрычны ланцуг на практыцы лічыцца лінейным.

Электрычны ланцуг, у якім электрычнае супраціўленне, індуктыўнасць або ёмістасць хоць бы аднаго ўчастка залежаць ад значэння або напрамку току і напружання, называецца *нелінейным электрычным ланцугом.* Нелінейныя электрычныя ланцугі маюць



Рыс. 1.7. Вольт-амперная характарыстыка:
а — лінейнага элемента; *б* — нелінейнага элемента

нелінейныя элементы. Вольт-ампернай характарыстыкай нелінейнага элемента з'яўляецца крывая лінія. Прыкладам нелінейных элементаў з'яўляюцца дыёды, электронныя лямпы, тэрмасупраціўленні, лямпы напальвання. Вольт-амперная характарыстыка дыёда паказана на рыс. 1.7, *б*.

Электрычныя ланцугі бываюць з паслядоўным злучэннем прымальнікаў (неразгалінаваныя электрычныя ланцугі), з паралельным (разгалінаваныя электрычныя ланцугі) і са змешаным.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх асноўных элементаў складаецца электрычны ланцуг?
2. Што называецца рэзістарам?
3. Па якой формуле вызначаецца супраціўленне рэзістара?
4. Як вызначаецца амічнае супраціўленне рэзістара? Актыўнае супраціўленне рэзістара?
5. Чаму актыўнае супраціўленне рэзістара большае за амічнае?
6. Якую уласцівасць маюць рэзістыўныя элементы ланцуга? Індуктыўныя і ёмістасныя элементы ланцуга?
7. Якія электрычныя ланцугі называюцца лінейнымі? Нелінейнымі? Прывядзіце прыклад нелінейнага элемента электрычнага ланцуга, начарціце графік яго вольт-ампернай характарыстыкі.

1.5. Ланцуг пераменнага току з рэзістыўным і індуктыўным элементамі

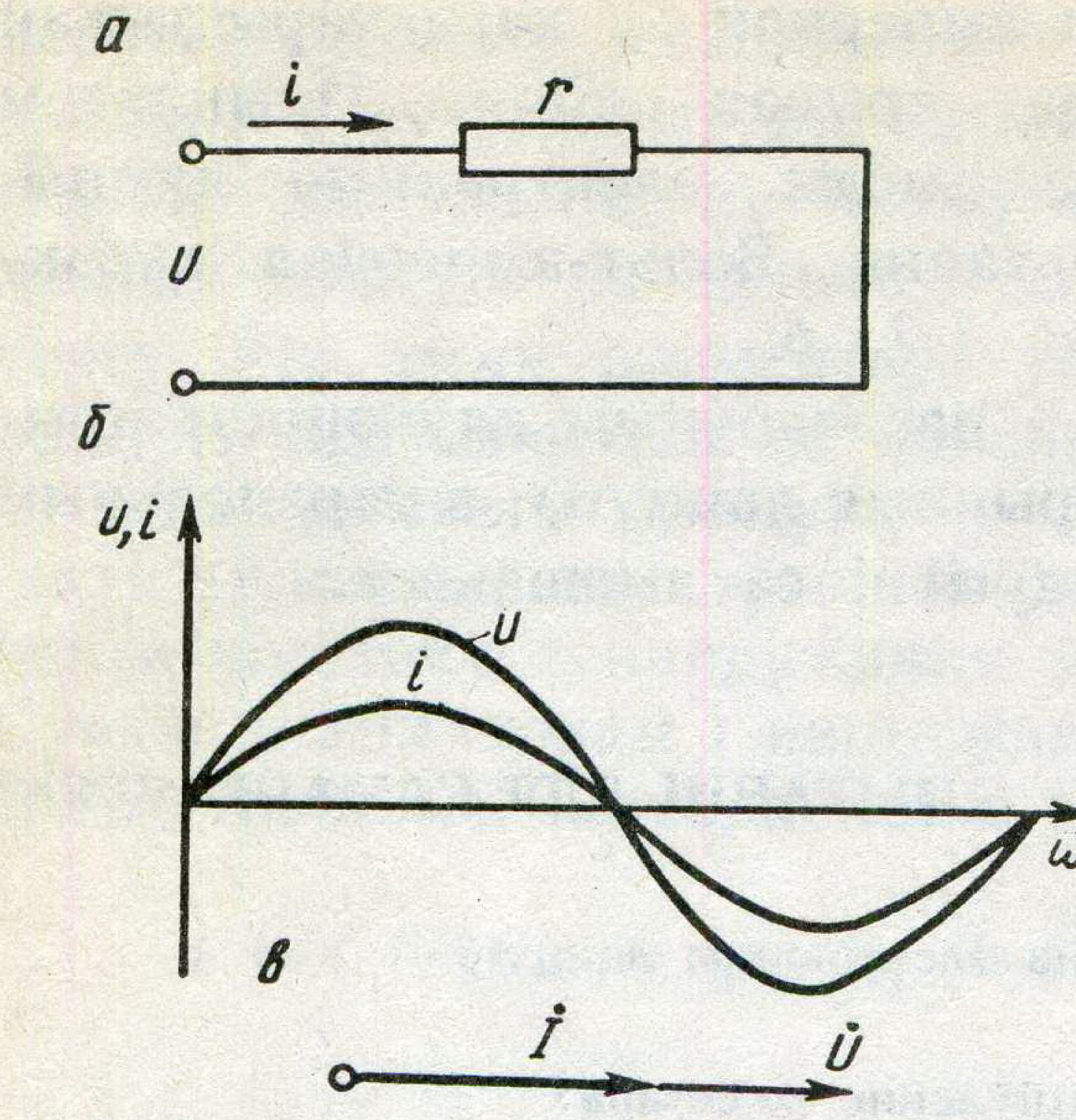
Электрычны ток у л а н ц у г у з р э з і с т ы ў н ы м э л е м е н т а м залежыць ад ЭРС крыніцы пераменнага току і ад супраціўлення ланцуга. Дапусцім, што ў электрычны ланцуг уключаны крыніца пераменнага току і рэзістар (рыс. 1.8, *а*). Рэзістар з'яўляецца лінейным элементам ланцуга і мае актыўнае супраціўленне. Пры актыўным супраціўленні электрычная энергія пераўтвараецца ў іншыя віды энергіі. Няхай напружанне ў ланцугу змяняецца паводле сінусоіднага закону:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Ток у ланцугу ў любы момант часу вызначаецца паводле закону Ома:

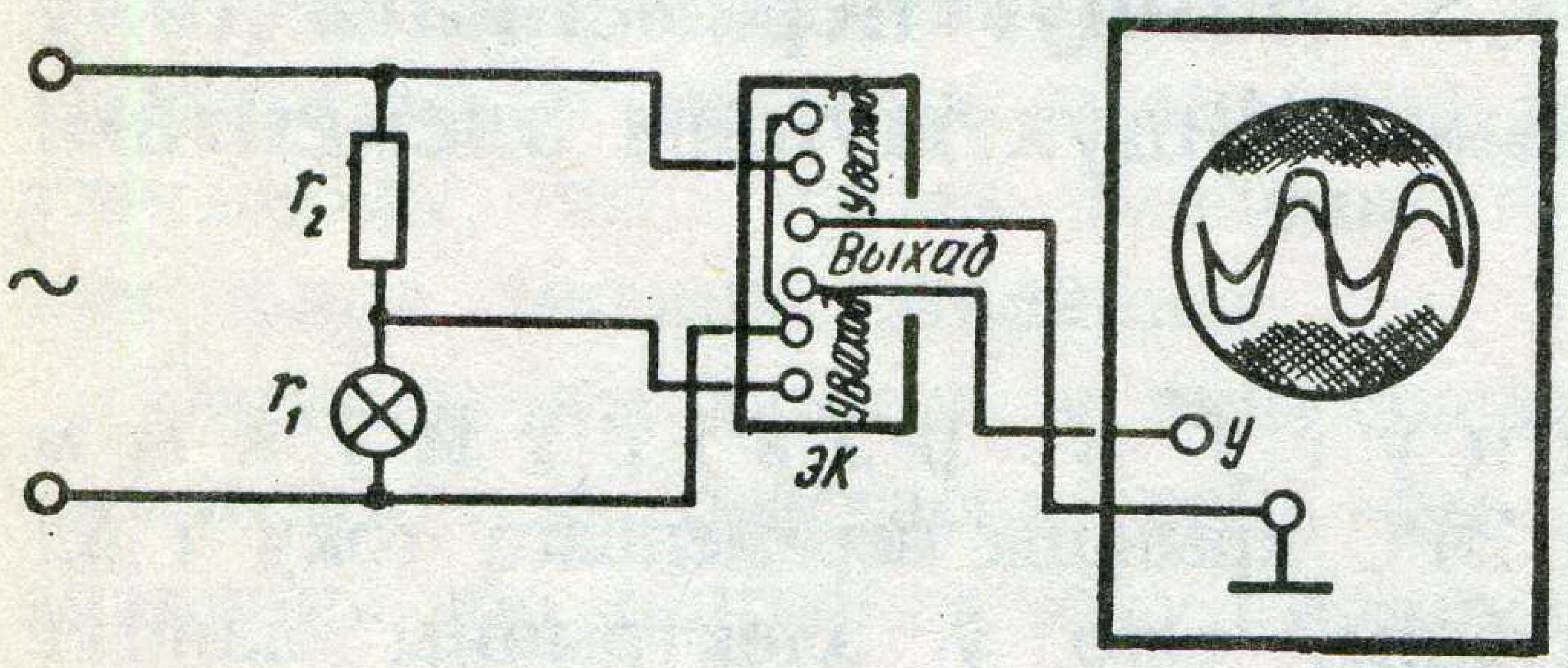
$$i = u/r = (U_m/r) \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

дзе $I_m = U_m/r$ або $I = U/r$.



Рыс. 1.8. Ланцуг пераменнага току з рэзістарам:
а — схема; *б* — графік; *в* — вектарная дыяграма току і напружання

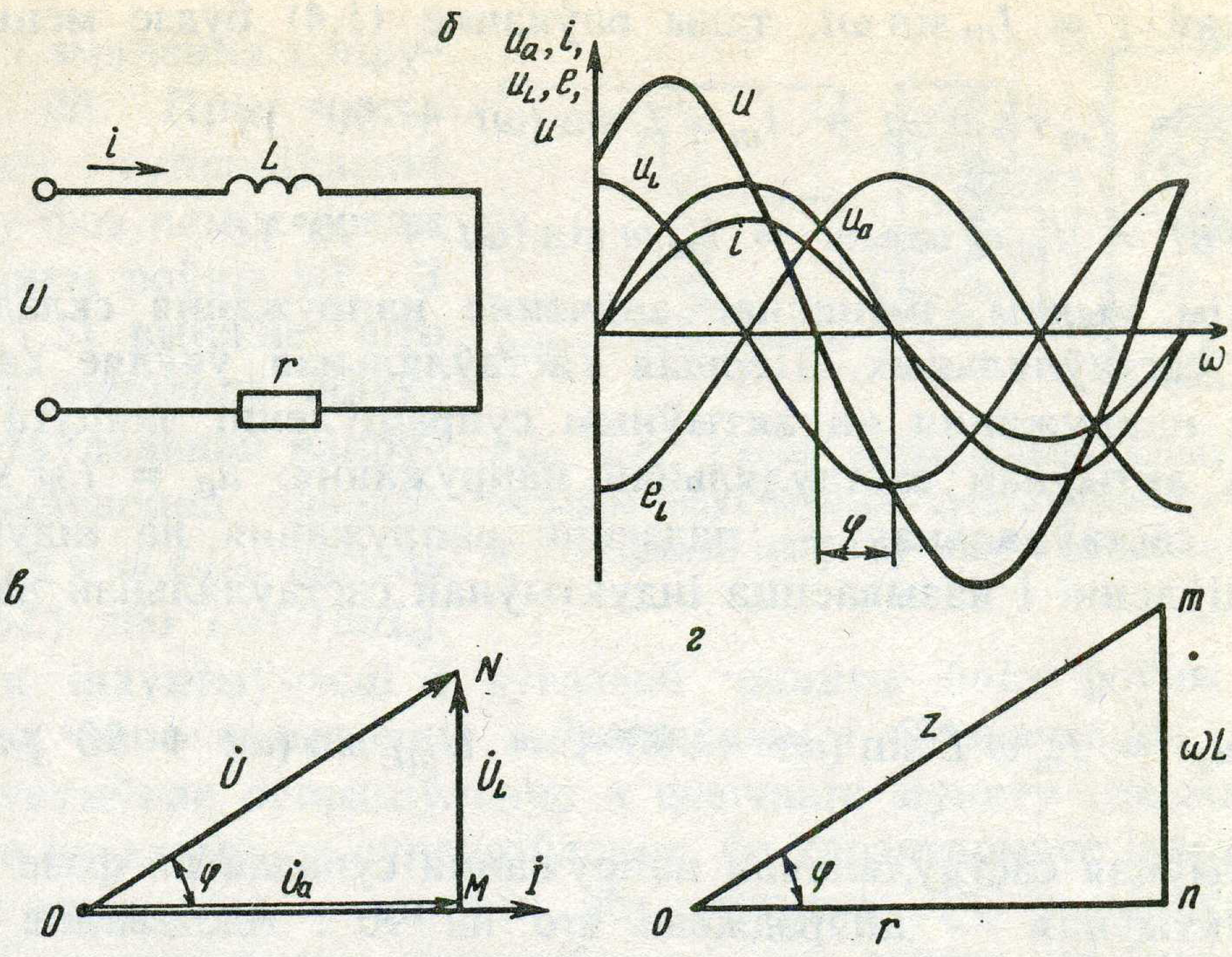
Аналагічна атрымаем комплексны ток $\dot{I} = \dot{U}/r$. Такім чынам, ток у ланцугу з рэзістыўным элементам таксама змяняецца паводле сінусоіднага закону і супадае па фазе з напружаннем. Графічна гэта можна паказаць у выглядзе дзвюх сінусоід (рыс. 1.8, *б*) або вектарнай дыяграмы з дапамогаю двух вектараў (рыс. 1.8, *в*). Сукупнасць вектараў комплексных значэнняў сінусоідных электрычных велічынь аднолькавай частаты называецца *вектарнай дыяграмай.* Пры пабудове вектарных дыяграм часта карыстаюцца комплекснымі дзейнымі значэннямі электрычных велічынь. У гэтым выпадку вектар комплекснага значэння адной электрычнай велічыні накіроўваюць уздоўж восі рэчаісных лікаў. Такі вектар комплекснага значэння называецца *зыходным.*



Рыс. 1.9. Схема электрычнага ланцуга з рэзістарам для дэманстрацыі графікаў току і напружання

Супадзенне па фазе току і напружання ў ланцугу пераменнага току з рэзістыўным элементам можна прадэманстраваць на электронным асцылографе, калі падключыць яго праз электронны камутатар у ланцуг з рэзістарам (рыс. 1.9). На экране асцылографа адна сінусоіда паказвае графік напружання ў ланцугу, а другая — графік току (падзенне напружання на рэзістары).

Разгледзім ланцуг з р э з і с т ы ў н ы м і і н д у к т ы ў н ы м э л е м е н т а м і (рыс. 1.10, *а*). Трансфарматар, электрарухавік, дросель акрамя актыўнага супраціўлення маюць таксама і індуктыўнае супраціўленне. Пры ўключэнні ў ланцуг пераменнага току дроселя ў ім узбуджаецца ЭРС самаіндукцыі, якая процідзейнічае падведзенаму напружанню. Гэта прыводзіць да памяншэння току ў ланцугу. Такім чынам, ЭРС самаіндукцыі



Рыс. 1.10. Ланцуг пераменнага току з рэзістарам і індуктыўным элементам: *а* — схема; *б* — графікі; *в* — вектарная дыяграма току і напружання; *г* — трохвугольнік супраціўленняў

абумоўлівае дадатковае супраціўленне. У гэтым можна пераканацца на вопыце. Збярыце электрычны ланцуг з паслядоўна злучаных лямпавага рэастата і катушкі трансфарматара з жалезным стрыжнем і ўключыце ў сетку пераменнага току. Пры замыканні стрыжня лямпы гаснуць, а пры размыканні лямпы гараць ярка. Гэта тлумачыцца тым, што пры замыканні магнітапровада павялічваецца індуктыўнасць катушкі, а значыць павялічваецца і яе індуктыўнае супраціўленне. Разгледзім гэту з'яву больш дэталёва. Пры праходжанні пераменнага току па катушцы ў ёй узбуджаецца ЭРС самаіндукцыі

$$e_L = -L\,(di/dt)\,,$$

дзе L — індуктыўнасць катушкі; di/dt — вытворная току па часе, характарызуе хуткасць змянення току.

Такім чынам, на сілу току ў ланцугу ўплывае не толькі падведзенае напружанне, але і ЭРС самаіндукцыі. Імгненнае значэнне току вызначаецца паводле закону Ома:

$$i = \frac{u + e_L}{r} = \frac{u - L\,(di/dt)}{r}\,.$$

Адсюль

$$u = ri + L\,(di/dt). \qquad (1.4)$$

Няхай $i = I_m \sin \omega t$, тады раўнанне (1.4) будзе мець выгляд

$$u = I_m r \sin \omega t + I_m \omega L \sin (\omega t + 90°),$$

дзе $di/dt = I_m \omega \cos \omega t = I_m \omega \sin (\omega t + 90°)$.

Такім чынам, імгненнае значэнне напружання складаецца з дзвюх састаўляльных. Першая састаўляльная ўяўляе сабою падзенне напружання на актыўным супраціўленні ланцуга і называецца актыўнай састаўляльнай напружання: $u_a = I_m r \sin \omega t$, а другая састаўляльная — падзенне напружання на індуктыўным супраціўленні і называецца індуктыўнай састаўляльнай напружання:

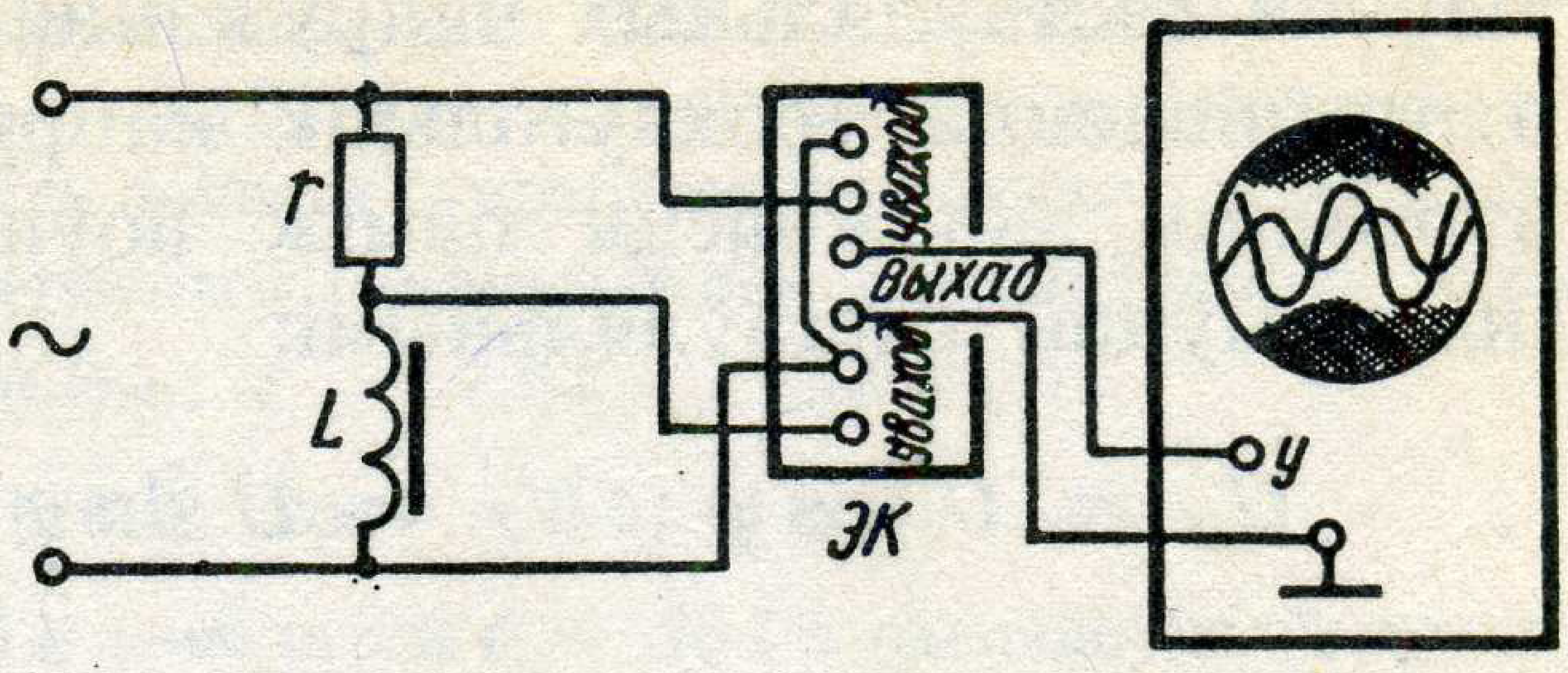
$$u_L = I_m \omega L \sin (\omega t + 90°) = U_{mL} \sin (\omega t + 90°). \quad (1.5)$$

Актыўная састаўляльная напружання супадае па фазе з токам, а індуктыўная — апярэджвае яго на 90°. Адставанне току па фазе на 90° ад напружання на індуктыўным супраціўленні тлумачыцца тым, што ў індуктыўным супраціўленні ўзбуджаецца ЭРС самаіндукцыі ($e_L = -L(di/t)$), якая прапарцыйна хуткасці змянення току. Такім чынам, у момант праходжання току праз нуль di/dt максімальнае і ЭРС дасягае максімальнага значэння, а калі ток набывае максімальнае значэнне, ЭРС самаіндукцыі роўная нулю. Такім чынам, ток апярэджвае ЭРС самаіндукцыі па фазе на 90°. А паколькі паводле правіла Ленца ЭРС самаіндукцыі e_L супрацьлеглая напружанню u_L, то адносна напружання u_L ток адстае па фазе на 90° (рыс. 1.10. *б*).

Імгненнае значэнне току і напружання пры актыўна-індуктыўным супраціўленні можна выразіць графічна (рыс. 1.10, *б*). Крывая u паказвае змяненне імгненнага значэння напружання на клемах ланцуга і з'уляецца алгебраічнай сумай імгненных значэнняў актыўнай і індуктыўнай састаўляльных напружання (u_a, u_L). Вугал φ — гэта зрух фаз паміж токам і напружаннем. Адставанне току ад напружання па фазе тлумачыцца наяўнасцю ў ланцугу індуктыўнага элемента, які выклікае ЭРС самаіндукцыі, тармозіць нарастанне току ў ланцугу.

У адставанні току ад напружання па фазе пры актыўна-індуктыўнай нагрузцы можна пераканацца на вопыце, калі ў ланцуг пераменнага току, які складаецца з рэастата і дросельнай катушкі, падключыць асцылограф з камутатарам (рыс. 1.11). На экране асцылографа сінусоіда току зрушана ўправа адносна сінусоіды напружання. У гэтым можна пераканацца, калі змяняць індуктыўнасць катушкі. Пры гэтым амплітуда левай сінусоіды таксама будзе змяняцца, бо змяненне супраціўлення ωL катушкі

прывядзе да змянення напружання на ёй. Пры чыста індуктыўным супраціўленні вугал зруху фаз паміж токам і напружаннем роўны 90°. З раўнання (1.5) вынікае, што амплітуднае значэнне індуктыўнай састаўляльнай напружання вызначаецца паводле формулы $U_{mL} = \omega LI_m$, адсюль $I_m = U_{mL}/(\omega L)$ або $I = U/(\omega L)$.



Рыс. 1.11. Схема электрычнага ланцуга з актыўна-індуктыўным супраціўленнем для дэманстрацыі графікаў току і напружання

Здабытак індуктыўнасці і вуглавой частаты (ωL) роўны супраціўленню, якое называецца *індуктыўным* і абазначаецца $x_L = \omega L$. Індуктыўнае супраціўленне з фізічнага пункту гледжання не падобнае на актыўнае супраціўленне, бо характарызуе інертныя ўласцівасці электрычнага ланцуга, абумоўленыя ЭРС самаіндукцыі ланцуга. У індуктыўным супраціўленні ток адстае па фазе ад напружання на 90°. Для атрымання x_L у омах трэба індуктыўнасць выражаць у генры:

$$[x_L] = \frac{\text{Гн}}{\text{с}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{А}} = \text{Ом}.$$

Запішам раўнанне (1.5) у сімвалічнай форме. Калі комплексную амплітуду току выразіць $\dot{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$, то комплексная амплітуда напружання

$$\dot{U}_{mL} = j\omega L I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = jx_L \dot{I}_m.$$

Такім чынам, $\dot{U}_{mL} = j\omega L\dot{I}_m$, або для комплексных дзейных велічынь $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$. Адсюль $\dot{I} = \dot{U}_L/(j\omega L)$, дзе $j\omega L = jx_L$ — комплекснае індуктыўнае супраціўленне. Комплекснае дзейнае напружанне роўнае здабытку комплекснага току, індуктыўнага супраціўлення і ўяўнай велічыні j. Множанне на j паказвае, што вектар напружання на індуктыўным супраціўленні апярэджвае вектар току на 90°.

Вектарная дыяграма для ланцуга з рэзістыўным і індуктыўным супраціўленнямі паказана на рыс. 1.10, *в*. Вектар актыўнай састаўляльнай напружання $\dot{U}_a = r\dot{I}$ супадае па напрамку з вектарам току, а вектар індуктыўнай састаўляльнай напружання $\dot{U}_L = jx_L\dot{I}$ апярэджвае вектар току на 90°.

Комплекснае дзейнае значэнне напружання ў ланцугу роўнае вектарнай суме комплексных дзейных значэнняў актыўнай і індук-

тыўнай састаўляльных напружання: $\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L$. Пры складанні атрымліваецца трохвугольнік напружанняў OMN, з якога можна атрымаць залежнасць паміж поўным напружаннем, актыўнай і індуктыўнай састаўляльнымі:

$$U_a = U\cos\varphi\,;\ U_L = U\sin\varphi\,;\ U_L = U_a\operatorname{tg}\varphi\,.$$

З гэтага ж трохвугольніка напружанняў маем: $U^2 = r^2I^2 + \omega^2L^2I^2$, адкуль аналагічна закону Ома запішам формулу для вызначэння модуля току:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2+\omega^2L^2}} = \frac{U}{z}\,,$$

дзе $z = \sqrt{r^2+\omega^2L^2}$ — модуль супраціўлення ланцуга.

Калі падзелім усе напружанні на ток, то атрымаем трохвугольнік супраціўленняў, падобны трохвугольніку напружанняў (рыс. 1.10, *г*). З трохвугольніка супраціўленняў маем $r = z\cos\varphi$; $x_L = z\sin\varphi$; $x_L = r\operatorname{tg}\varphi$. З гэтых раўнанняў можна запісаць формулы для вызначэння зруху фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу:

$$\cos\varphi = r/z\,;\ \sin\varphi = x_L/z\,;\ \operatorname{tg}\varphi = x_L/r\,.$$

Закон Ома для ланцуга запішацца ў такім выглядзе:

$$\dot{I} = \dot{U}/Z = \dot{U}/(r+j\omega L)\,.$$

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Якое супраціўленне называецца актыўным? Прывядзіце прыклады актыўнага супраціўлення.

2. Чаму роўны зрух фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу пераменнага току з рэзістыўным элементам?

3. Начарціце графік і вектарную дыяграму току і напружання для ланцуга з рэзістыўным элементам.

4. Чаму роўны зрух фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу пераменнага току з індуктыўным супраціўленнем?

5. Начарціце графік і вектарную дыяграму току і напружання для ланцуга з актыўна-індуктыўным супраціўленнем.

6. Запішыце формулу закону Ома ў сімвалічнай форме для ланцуга пераменнага току з актыўна-індуктыўным супраціўленнем.

7. Растлумачце вопыты, якія дэманструюць наяўнасць індуктыўнага супраціўлення ў ланцугу пераменнага току і зрух фаз паміж токам і напружаннем.

8. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц уключана катушка індуктыўнасцю $L = 0{,}127$ Гн і актыўным супраціўленнем $r = 30$ Ом. Вызначце індуктыўнае і модуль поўнага супраціўлення катушкі, комплексны ток і модуль току, напружанні на актыўным і індуктыўным супраціўленнях, $\cos\varphi$.

Адказ: $x_L = j\,40$ Ом; $z = 50$ Ом; $\dot{I} = 2{,}64 - j\,3{,}52$ А;

$I = 4{,}4$ А; $U_r = 132$ В; $U_L = j\,176$ В; $\cos\varphi = 0{,}6$.

9. У сетку напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц паслядоўна ўключаны два прымальнікі, актыўныя і індуктыўныя супраціўленні якіх роўныя $r_1 = 50$ Ом; $x_{L1} = 20$ Ом; $r_2 = 10$ Ом; $x_{L2} = 80$ Ом. Вызначце комплекснае супраціўленне ў ланцугу, ток у ланцугу, напружанне на першым і другім прымальніках, зрух фаз паміж токам і напружаннем ў ланцугу.

Адказ: $Z = (60 + j\,100)$ Ом; $\dot{I} = 0{,}97 - j\,1{,}62$ А; $I = 1{,}89$ А; $\dot{U}_1 = 94{,}5 + j\,37{,}8$ В; $U_1 = 101{,}78$ В; $\dot{U}_2 = 18{,}9 + j\,151{,}2$ В; $U_2 = 152{,}38$ В; $\varphi = 59{,}03°$.

10. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц уключаны паслядоўна тры прымальнікі, актыўныя і індуктыўныя супраціўленні якіх роўныя: $r_1 = 3$ Ом; $x_1 = 4$ Ом; $r_2 = 2$ Ом; $x_2 = 6$ Ом; $r_3 = 7$ Ом; $x_3 = 6$ Ом. Вызначце комплекснае супраціўленне ланцуга, комплексны ток і модуль току ў ланцугу, комплекснае напружанне і модуль напружання на клемах прымальнікаў, індуктыўнасць ланцуга.

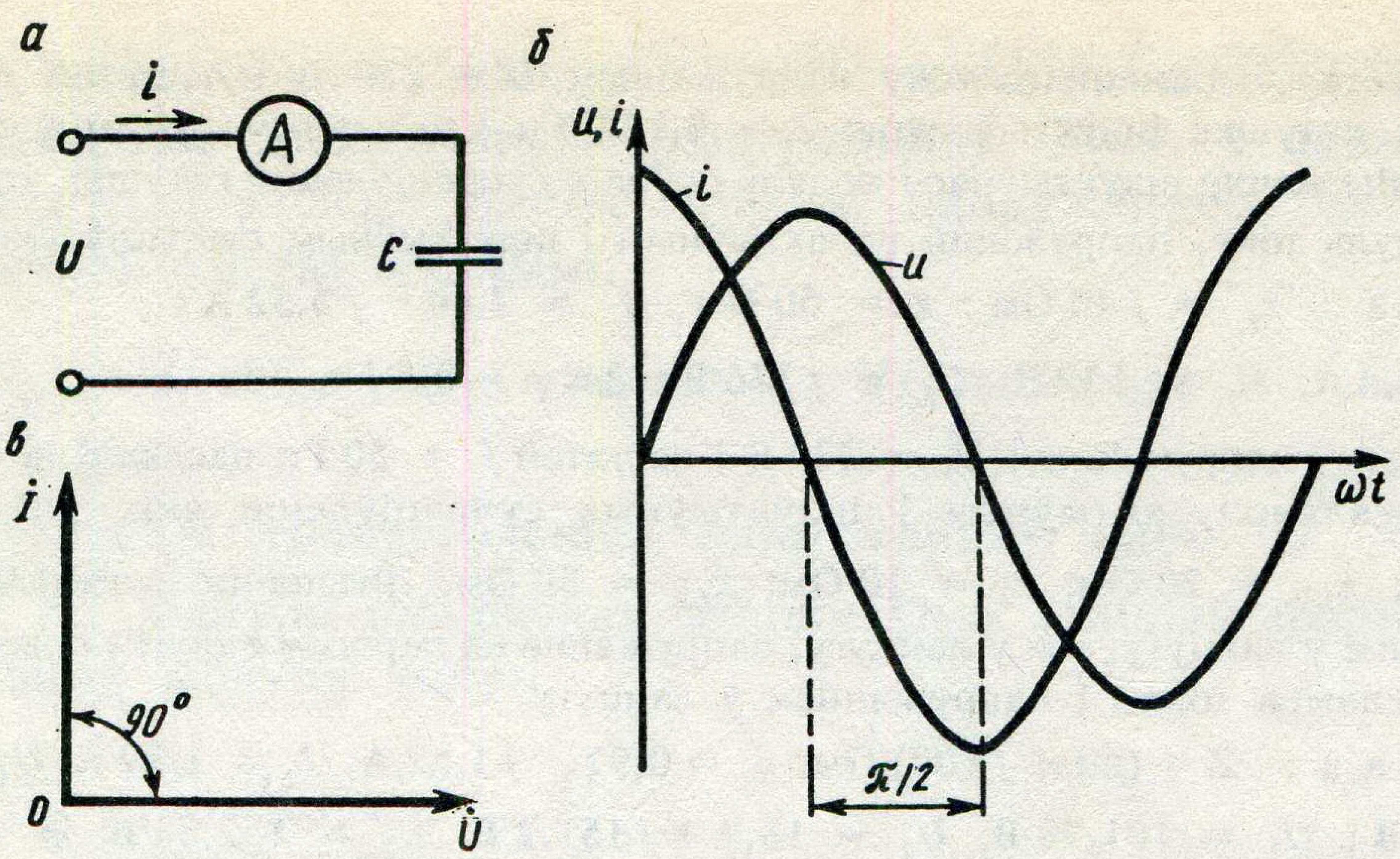
Адказ: $Z = 12 + j\,16$ Ом; $\dot{I} = 6{,}6 - j\,8{,}8$ А; $I = 11$ А;

$\dot{U}_1 = 33 + j44$ В; $U_1 = 55$ В; $\dot{U}_2 = 22 + j\,66$ В; $U_2 = 69{,}57$ В;

$\dot{U}_3 = 77 + j\,66$ В; $U_3 = 101{,}4$ В; $L = 50{,}93$ м Гн.

1.6. Ланцуг пераменнага току з кандэнсатарам

Збяром электрычны ланцуг з кандэнсатара і амперметра. Падключым яго да крыніцы пастаяннага току і пераканаемся ў адсутнасці току ў ланцугу. Такім чынам, для пастаяннага току кандэнсатар стварае разрыў ланцуга. Падключым гэты ланцуг да крыніцы пераменнага току (рыс. 1.12, *а*), заўважаем адхіленне стрэлкі амперметра, наяўнасць у ланцугу току. Ток у кандэнсатары, у адрозненне ад току праводнасці, які з'яўляецца накіраваным рухам свабодных зарадаў у праваднiках, называецца *токам зрушэння,* і яго значэнне вызначаецца хуткасцю змянення зарадаў на абкладках кандэнсатара: $i = dq/dt$. Паколькі $q = Cu$, то для кандэнсатара ёмістасцю C атрымаем $i = C\,(du/dt)$. Пры $u = U_m \sin\omega t$ ток таксама будзе змяняцца паводле сінусоіднага закону:



Рыс. 1.12. Ланцуг пераменнага току з кандэнсатарам:
а — схема; *б* — графікі; *в* — вектарная дыяграма току і напружання

$$i = C\,(du/dt) = \omega\, CU_m \cos \omega t = \omega\, CU_m \sin(\omega t + 90°) =$$
$$= I_m \sin(\omega t + 90°).$$

Такім чынам, у ланцугу пераменнага току пры ёмістаснай нагрузцы ток апярэджвае напружанне па фазе на 90°.

Графікі току і напружання паказаны на рыс. 1.12, *б*. Зрух фаз паміж токам і напружаннем пры ёмістаснай нагрузцы можна назіраць на вопыце, пры якім у ланцуг пераменнага току з рэастата і батарэі кандэнсатараў падключаецца асцылограф з камутатарам. На экране з'яўляюцца дзве сінусоіды. Сінусоіда току будзе перамешчана ўлева адносна сінусоіды напружання па фазе на 90°. Гэта адбываецца таму, што ў пачатку зарадкі кандэнсатара хуткасць накаплення зарадаў на абкладках кандэнсатара вялікая і ток у провадзе вялікі, а ў канцы зарадкі кандэнсатара напружанне максімальнае, а ток ў провадзе роўны нулю. Пры перазарадцы кандэнсатара, у момант змянення знака зарада на абкладках кандэнсатара, напружанне на кандэнсатары роўнае нулю, а ток у правадах максімальны.

Вызначым комплексную амплітуду току ў ланцугах з кандэнсатарам. Няхай комплексная амплітуда напружання $\dot{U}_m = U_m e^{j(\omega t + \psi_u)}$, тады комплексная амплітуда току

$$\dot{I}_m = C\,(d\dot{U}_m/dt) = j\omega\, CU_m e^{j(\omega t + \psi_u)} = j\omega\, C\dot{U}_m. \qquad (1.6)$$

Множанне на j паказвае, што вектар комплекснай амплітуды току павёрнуты ў дадатным напрамку на 90° адносна вектара

напружання. На вектарнай дыяграмме (рыс. 1.12, *в*) вектар комплекснага току апярэджвае вектар комплекснага напружання на 90°. З раўнання (1.6) можна запісаць: $\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{1/(j\omega C)} = -\frac{\dot{U}_m}{j(1/\omega C)} = -\frac{\dot{U}_m}{jx_c}$ або для комплексных дзейных значэнняў $\dot{I} = -\frac{\dot{U}}{j(1/\omega C)} = -\frac{\dot{U}}{jx_c}$, дзе $-j(1/\omega C) = -jx_c$ — ёмістаснае супраціўленне. Ёмістаснае супраціўленне, як і індуктыўнае, з фізічнага пункту гледжання не падобнае да актыўнага супраціўлення. Ёмістаснае супраціўленне залежыць ад хуткасці палярызацыі дыэлектрыка кандэнсатара. Значэнне ёмістаснага супраціўлення адваротна прапарцыйнае вуглавой частаце і ёмістасці кандэнсатара. Для атрымання x_c у омах C трэба выражаць у фарадах. Напрыклад, кандэнсатар ёмістасцю 10 мкФ у ланцугу пераменнага току з частатой 50 Гц мае супраціўленне

$$x_c = \frac{1}{2 \cdot 3{,}1416 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{3141{,}6} = 318{,}3\ \text{Ом}.$$

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

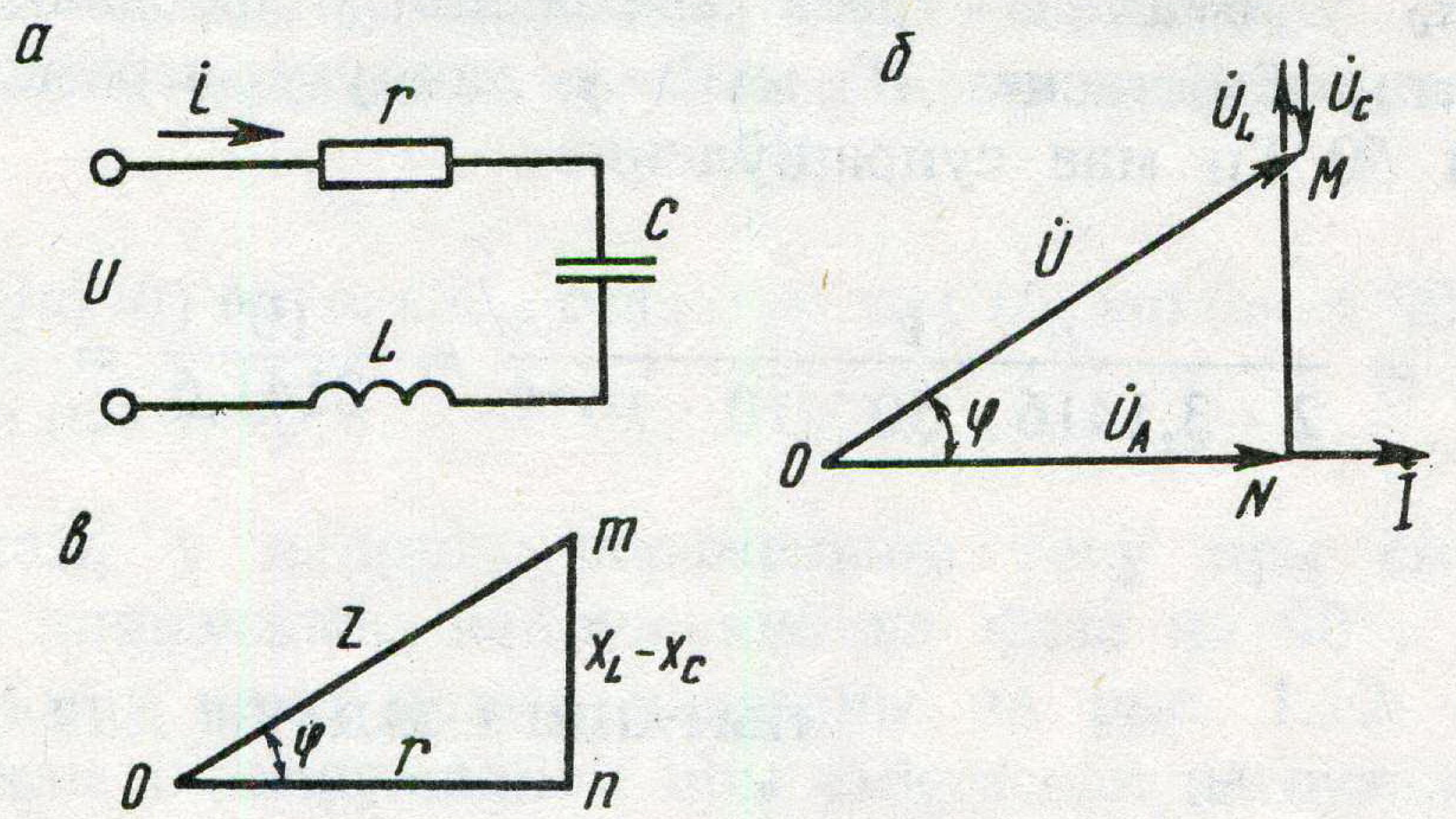
1. У чым адрозненне току зрушэння ад току праводнасці?
2. Чым вызначаецца ток зрушэння?
3. Начарціце графікі і вектарную дыяграму току і напружання пры ёмістаснай нагрузцы ланцуга.
4. Запішыце закон Ома ў сімвалічным выглядзе для ланцуга пераменнага току з ёмістаснай нагрузкай.
5. Ад чаго залежыць ёмістаснае супраціўленне ланцуга? У чым фізічны сэнс ёмістаснага супраціўлення кандэнсатара?
6. Кандэнсатар ёмістасцю $C = 50$ мкФ падключаны ў сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц. Вызначыць ток у кандэнсатары.

   Адказ: $I = 3{,}46$ А.
7. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц уключаны паслядоўна рэзістар $r = 50$ Ом і кандэнсатар ёмістасцю $C = 100$ мкФ. Вызначце комплексны ток ў ланцугу і модуль напружання на рэзістары і на кандэнсатары.

   Адказ: $\dot{I} = 3{,}13 + j2$ А; $I = 3{,}7$ А; $U_r = 185$ В; $U_c = 117{,}8$ В.

1.7. Электрычны ланцуг з паслядоўным злучэннем рэзістыўнага, індуктыўнага і ёмістаснага супраціўленняў

У практыцы часта прыходзіцца мець справу з электрычнымі ланцугамі, у якіх паслядоўна злучаны рэзістар, катушка індуктыўнасці і кандэнсатар (рыс. 1.13). Пры падключэнні такога ланцуга да напружання $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ у ланцугу будзе праходзіць аднолькавы сінусоідны ток на ўсіх участках ланцуга. Калі ток ў ланцугу змяняецца па гарманічным законе, то падзенне



Рыс. 1.13. Ланцуг пераменнага току з рэзістыўным, індуктыўным і ёмістасным элементамі:

а — схема; *б* — вектарная дыяграма току і напружання; *в* — трохвугольнік супраціўленняў

напружання на асобных участках ланцуга будзе змяняцца па гарманічным законе. Пры гэтым на падставе закону Кірхгофа можна запісаць

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_c = r\dot{I} + j\omega L\dot{I} - j(1/(\omega C))\dot{I} =$$

$$= r\dot{I} + j(x_L - x_c)\dot{I} = Z\dot{I}, \qquad (1.7)$$

дзе $j(x_L - x_c) = j(\omega L - 1/(\omega C))$ у адрозненне ад актыўнага супраціўлення называецца *рэактыўным супраціўленнем*, а $Z = r + j(\omega L - 1/(\omega C))$ — *поўным комплексным супраціўленнем ланцуга.*

З раўнання (1.7) можна запісаць формулу закону Ома

$$\dot I = \frac{\dot U}{r + j(\omega L - 1/(\omega C))} = \dot U / Z .$$

У адпаведнасці з раўнаннем (1.7) начэрцім вектарную дыяграму За выходны вектар возьмем вектар току (рыс. 1.13, *б*). Вектар падзення напружання на індуктыўным супраціўленні $\dot U_L = j\omega L \dot I$ будзе павернуты адносна вектара току ў дадатным напрамку на 90° (напружанне на індуктыўным супраціўленні апярэджвае ток на 90°), а вектар падзення напружання на ёмкістасным супраціўленні $\dot U_C = j(1/(\omega C))\dot I$ — у адмоўным напрамку адносна вектара току на 90° (напружанне на ёмістасным супраціўленні адстае ад току на 90°). Такім чынам, вектары $\dot U_L$ і $\dot U_C$ будуць знаходзіцца ў процiфазах.

Няхай вектар $\dot U_L$ па модулю большы за вектар $\dot U_C$. Тады з трохвугольніка *OMN* будзем мець:

$$U^2 = U_r^2 + (U_L - U_c)^2 = r^2 I^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 I^2 .$$

Адсюль

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega c})^2}} = \frac{U}{z} .$$

Гэты выраз аналагічны закону Ома. Ён дае магчымасць вылічыць модуль току, але не вызначае аргумент току. Дзельнік $z = \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ з'яўляецца модулем поўнага супраціўлення ланцуга.

Падзяліўшы стораны трохвугольніка напружання на значэнне току, атрымаем падобны трохвугольнік *omn* супраціўлення (рыс. 1.13, *в*). Модуль поўнага супраціўлення z можна вызначыць з трохвугольніка супраціўлення. Для выпадку, калі ў ланцугу ёмістаснае супраціўленне большае за індуктыўнае, вугал зруху фаз паміж токам і агульным напружаннем у ланцугу φ будзе адмоўны. Вугал зруху фаз паміж токам і напружаннем вызначаецца паводле формулы

$$\cos\varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin\varphi = \frac{x_L - x_c}{z}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L - x_c}{r}.$$

Няхай у электрычным ланцугу ўключаны некалькі актыўных, індуктыўных і ёмістасных супраціўленняў. З курсу фізікі вядома,

што пры паслядоўным злучэнні супраціўленняў агульнае супраціўленне ланцуга роўнае суме супраціўленняў яго ўчасткаў. У ланцугу пераменнага току асобна складваюцца актыўныя, індуктыўныя і емістасныя супраціўленні: $r = \sum_n r_n$; $x_L = \sum_m x_{Lm}$; $x_c = \sum_k x_{ck}$, а модуль поўнага супраціўлення ланцуга роўны $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_c)^2}$. Сума супраціўленняў усіх паслядоўна злучаных участкаў ланцуга называецца *эквівалентным супраціўленнем.*

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Начарціце вектарную дыяграму току і напружання для ланцуга з паслядоўным злучэннем рэзістара, катушкі індуктыўнасці і кандэнсатара.

2. Запішыце формулу закону Ома ў сімвалічным выглядзе для ланцуга пераменнага току з паслядоўным злучэннем актыўнага, індуктыўнага і емістаснага супраціўленняў.

3. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В паслядоўна ўключаны рэзістар супраціўленнем $r = 80$ Ом, катушка індуктыўнасці $x_L = 100$ Ом, кандэнсатар супраціўленнем $x_c = 40$ Ом. Вызначыць комплекснае супраціўленне ланцуга, комплексны ток і модуль току ў ланцугу, напружанне на кожным элеменце ланцуга.

Адказ: $Z = 80 + j60$ Ом; $\dot{I} = 1{,}76 - j1{,}32$ А; $I = 2{,}2$ А; $U_r = 176$ В; $\dot{U}_L = j220$ В; $\dot{U}_c = -j88$ В.

4. У сетку пераменнага току з напружаннем $U = 127$ В паслядоўна ўключаны два прымальнікі, комплексныя супраціўленні якіх роўныя $Z_1 = 50e^{j60°}$ Ом і $Z_2 = 40e^{-j30°}$ Ом. Вызначыць комплекснае супраціўленне і модуль супраціўлення ланцуга, комплексны ток і модуль току ў ланцугу, напружанне на кожным прымальніку і $\cos\varphi$ у ланцугу.

Адказ: $Z = 64{,}03e^{j21{,}34°}$ Ом; $z = 64{,}03$ Ом; $\dot{I} = 1{,}984e^{-j21{,}34°}$ А; $I = 1{,}984$ А; $\dot{U}_1 = 99{,}2e^{j38{,}66°}$ В; $U_1 = 99{,}2$ В; $\dot{U}_2 = 79{,}36e^{-j51{,}34°}$ В; $U_2 = 79{,}36$ В; $\cos\varphi = 0{,}931$.

5. У сетку пераменнага току з частатой $f = 50$ Гц паслядоўна ўключаны: рэастат з супраціўленнем $r = 38$ Ом, катушка індуктыўнасцю $L = 150$ мГн і кандэнсатар ёмістасцю $C = 127{,}5$ мкФ. Вызначыць падзенне напружання на кожным супраціўленні і на ўсім ланцугу пры току ў ланцугу $I = 5$ А. Начарціць вектарную дыяграму.

Адказ: $\dot{U}_r = 190$ В; $\dot{U}_L = 235{,}6e^{j90°}$ В; $\dot{U}_c = 124{,}8e^{-j90°}$ В; $U = 219{,}9e^{j30{,}23°}$ В.

6. У сетку напружаннем $U = 220$ В паслядоўна ўключаны тры прымальнікі, якія маюць наступныя супраціўленні: $r_1 = 10$ Ом; $r_2 = 24$ Ом; $r_3 = 6$ Ом; $x_{L1} = 20$ Ом; $x_{c2} = 18$ Ом; $x_{L3} = 16{,}5$ Ом. Вызначыць комплексны ток і модуль

току ў ланцугу, зрух фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу, напружанне на кожным прымальніку. Начарціць вектарную дыяграму.

А д к а з: $\dot{I} = 5{,}04e^{-j23{,}62^\circ}$ А; $I = 5{,}04$ А; $\varphi = 23{,}62^\circ$;

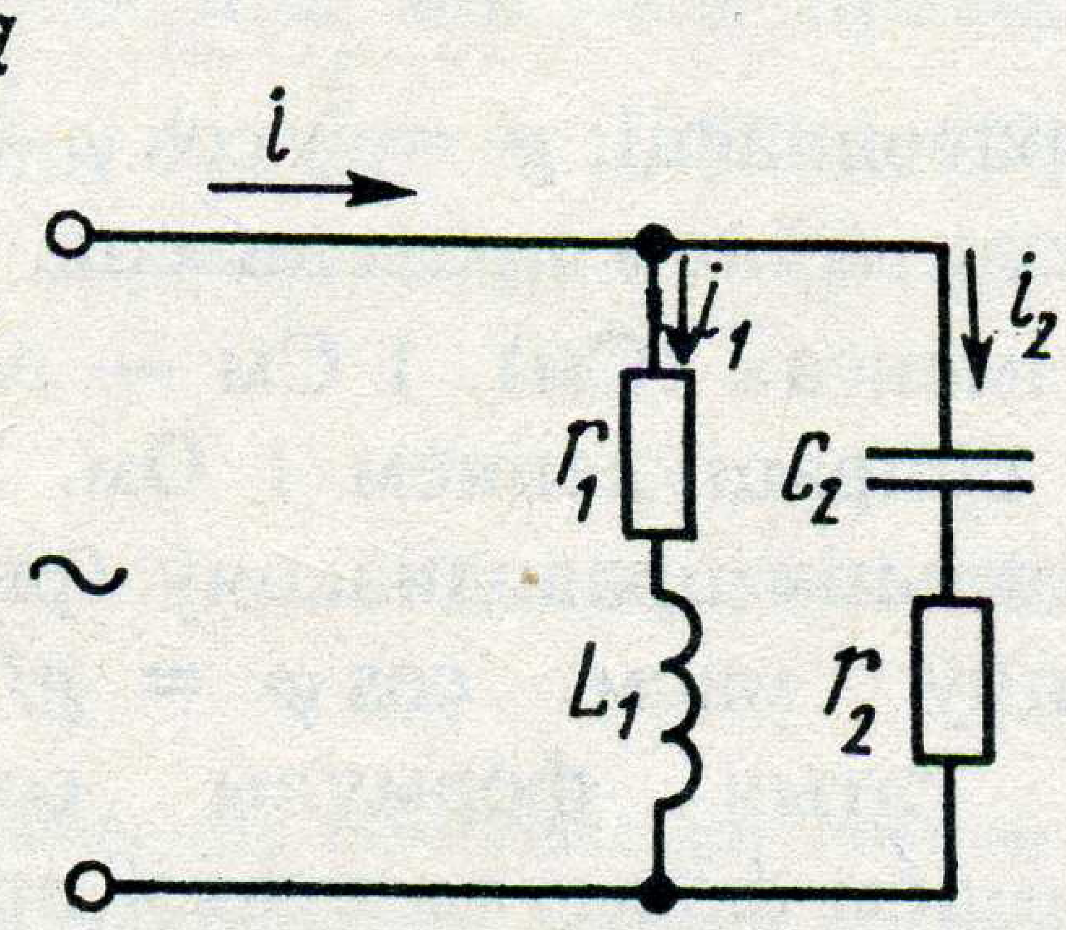
$\dot{U}_1 = 112{,}69e^{j39{,}83^\circ}$ В; $U = 112{,}69$ В; $\dot{U}_2 = 151{,}2e^{-j60{,}49^\circ}$ В;

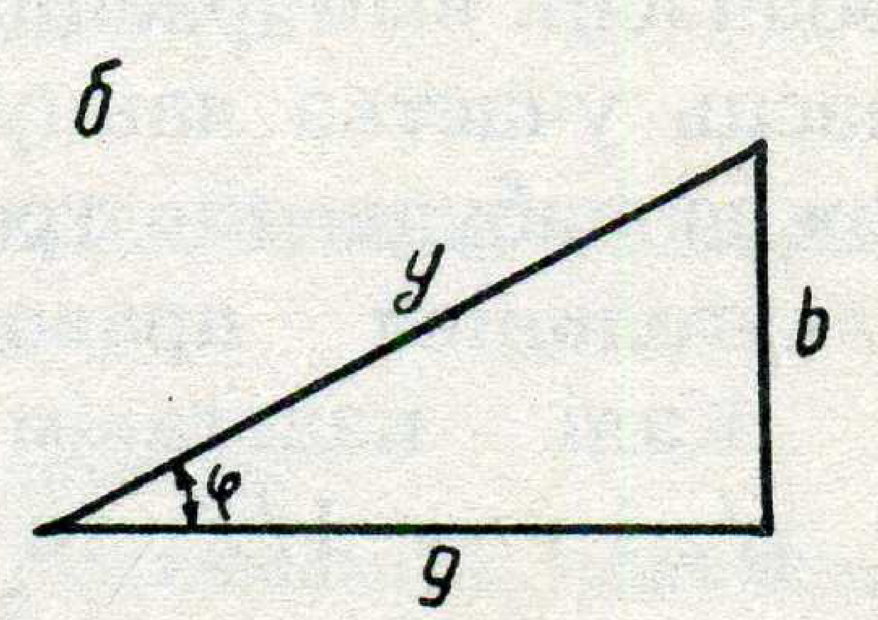
$U_2 = 151{,}2$ В; $\dot{U}_3 = 88{,}5e^{j46{,}4^\circ}$ В; $U_3 = 88{,}5$ В.

7. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц уключаны паслядоўна тры прымальнікі, супраціўленні якіх роўныя: $r_1 = 50$ Ом; $x_{L1} = 80$ Ом; $r_2 = 40$ Ом; $x_{L2} = 20$ Ом; $r_3 = 10$ Ом; $x_{c3} = 60$ Ом. Вызначыць комплексны ток і модуль току ў ланцугу, зрух фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу, напружанне на кожным прымальніку. Начарціць вектарную дыяграму.

А д к а з: $\dot{I} = 2{,}043e^{-j21{,}8^\circ}$ А; $I = 2{,}043$ А; $\varphi = 21{,}8^\circ$; $\dot{U}_1 = 192{,}7e^{j58^\circ}$ В; $\dot{U}_2 = 91{,}36e^{j26{,}56^\circ}$ В; $\dot{U}_3 = 124{,}3e^{-j80{,}54^\circ}$ В.

1.8. Электрычны ланцуг з паралельным злучэннем супраціўленняў





Рыс. 1.14. Ланцуг пераменнага току з паралельным злучэннем супраціўленняў: *а* — схема; *б* — трохвугольнік праводнасцяў

У ланцугу пераменнага току з паралельным злучэннем супраціўленняў (рыс. 1.14, *а*) напружанне з'яўляецца агульным для ўсіх прымальнікаў, а токі кожнай галіны вызначаюцца стасункамі $\dot{I}_1 = \dot{U}/Z_1$; $\dot{I}_2 = \dot{U}/Z_2$. Ток у неразгалінаванай частцы ланцуга вызначаецца як вектарная сума токаў асобных галін: $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$. Зрух фаз паміж токам і напружаннем у галінах можна вызначыць паводле формул:

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1};\ \cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2};\ \operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{x_1}{r_1};\ \operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{x_2}{r_2}.$$

Для разліку разгалінаваных электрычных ланцугоў уводзіцца паняцце комплекснай праводнасці. *Комплекснай праводнасцю* называецца велічыня, адваротная комплекснаму супраціўленню:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{r + j(x_L - x_c)} = \frac{r - j(x_L - x_c)}{r^2 + (x_L - x_c)^2} =$$

$$= \frac{r}{z^2} - j\frac{x_L}{z^2} + j\frac{x_c}{z^2} = g - jb_L + jb_c = g - jb.$$

Рэчаісная частка комплекснай праводнасці з'яўляецца актыўнай праводнасцю і абазначаецца g, а ўяўная — рэактыўнай і абазначаецца b: $b = b_L - b_c$. Комплексная поўная праводнасць Y вызначаецца стасункам комплекснага току да комплекснага напружання:

$$Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{I\,e^{j\psi_i}}{U\,e^{j\psi_u}} = \frac{I}{U}\,e^{-j(\psi_u - \psi_i)} =$$

$$= ye^{-j\varphi} = y\cos\varphi - jy\sin\varphi = g - jb, \tag{1.8}$$

дзе $y = 1/z$ — модуль поўнай праводнасці; $g = y\cos\varphi$ — актыўная праводнасць; $jb = jy\sin\varphi$ — рэактыўная праводнасць.

Праводнасць вымяраецца ў сіменсах (См). 1 См — электрычная праводнасць участка ланцуга з супраціўленнем 1 Ом. З раўнання (1.8) можна пабудаваць трохвугольнік праводнасцяў (рыс. 1.14, *б*). З трохвугольніка праводнасцяў маем $\cos\varphi = g/y$, $\sin\varphi = b/y$. Калі падставім у гэтыя формулы $\cos\varphi = r/z$, $\sin\varphi = x/z$ і $y = 1/z$, то атрымаем формулы сувязі праводнасцяў і супраціўленняў: $g = r/z^2$, $b = x/z^2$ і наадварот $r = g/y^2$, $x = b/g^2$.

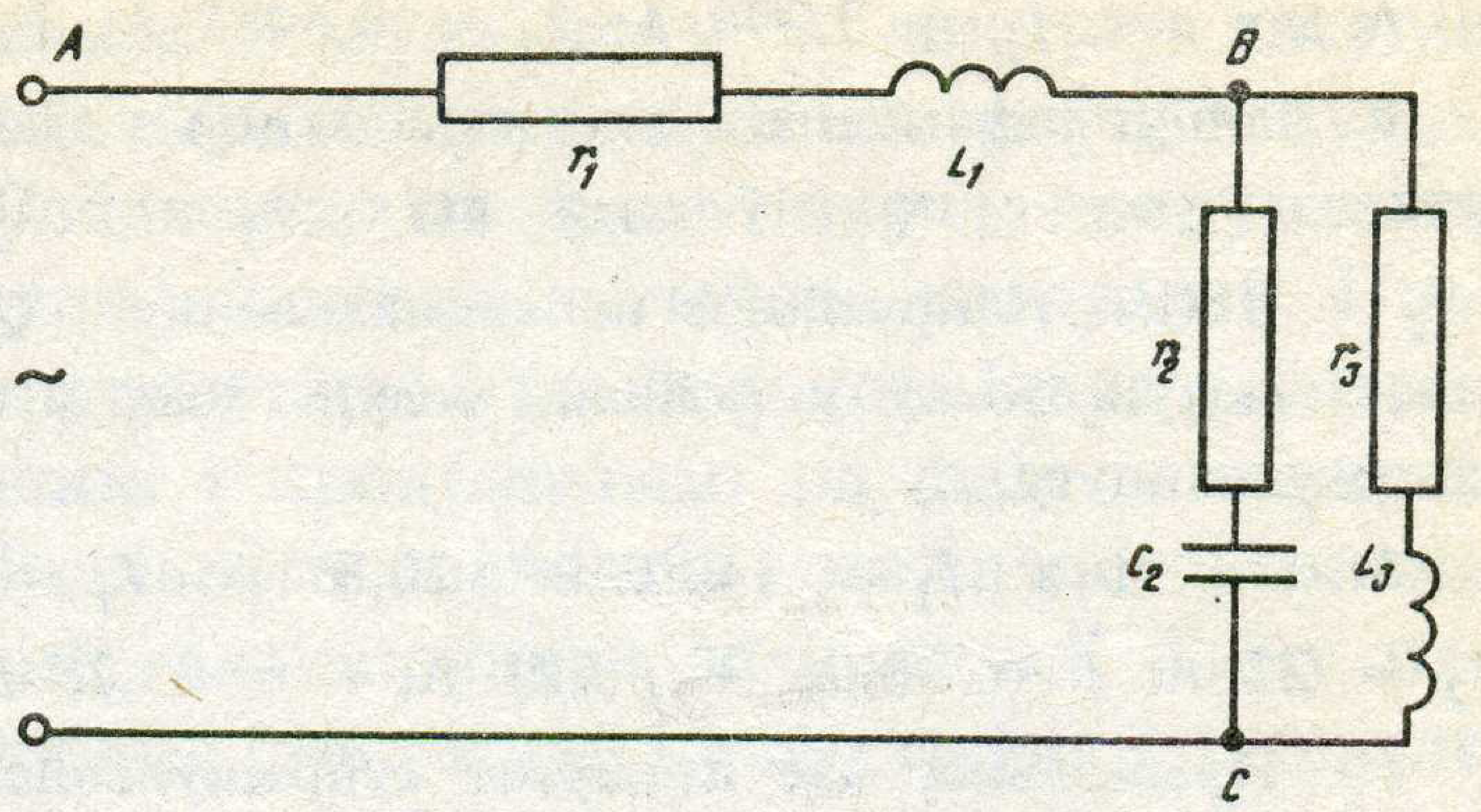
Комплексная праводнасць пры паралельным злучэнні прымальнікаў роўная суме комплексных праводнасцяў кожнага прымальніка:

$$Y = Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_n = g_1 + g_2 + \ldots + g_n -$$

$$- j\left[(b_{L1} + b_{L2} + \ldots + b_{Lm}) - (b_{c1} + b_{c2} + \ldots + b_{ck})\right] = g - jb,$$

дзе g — арыфметычная сума актыўных праводнасцяў прымальнікаў; jb — алгебраічная сума рэактыўных праводнасцяў прымальнікаў.

При змешаным злучэнні прымальнікаў (рыс. 1.15) трэба спачатку вызначыць актыўныя і рэактыўныя праводнасці участка BC з паралельным злучэннем прымальнікаў:



Рыс. 1.15. Схема электрычнага ланцуга са змешаным злучэннем прымальнікаў

$g_{BC} = g_2 + g_3 = \frac{r_2}{z_2^2} + \frac{r_3}{z_3^2}$; $b_{LBC} = \frac{x_{L2}}{z_2^2} + \frac{x_{L3}}{z_3^2}$; $b_{CBC} = \frac{x_{c2}}{z_2^2} + \frac{x_{c3}}{z_3^2}$, а $Y_{BC} = g_{BC} - j(b_{LBC} - b_{CBC})$. Потым вызначыць супраціўленні паралельнага ўчастка BC праз праводнасці:

$$r_{BC} = \frac{g_{BC}}{y_{BC}^2};\ x_{LBC} = \frac{b_{LBC}}{y_{BC}^2};\ x_{CBC} = \frac{b_{CBC}}{y_{BC}^2},$$

дзе y_{BC} з'яўляецца модулем праводнасці паралельнага участка BC ($y_{BC} = \sqrt{g_{BC}^2 + b_{BC}^2}$). Цяпер можна разглядаць ланцуг з двух паслядоўна злучаных участкаў AB і BC.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца комплекснай поўнай праводнасцю?
2. Запішыце комплексную поўную праводнасць у паказальнай, трыганаметрычнай і алгебраічнай формах.
3. Начарціце трохвугольнік праводнасцяў.
4. Чаму роўная поўная праводнасць прымальнікаў, злучаных паралельна? Як складваюцца актыўныя і рэактыўныя праводнасці?
5. Запішыце формулы сувязі праводнасцяў з супраціўленнямі ланцуга.
6. У якіх адзінках вымяраецца праводнасць ланцуга і што прымаецца за 1 См?
7. Чаму роўны комплексны ток і модуль току ў неразгалінаваным учвастку ланцуга, калі амперметры, уключаныя ў паралельныя галіны ланцуга, паказалі 5 А; 4 А пры $\cos\varphi_1 = 0{,}6$ і $\cos\varphi_2 = 0{,}8$?

А д к а з: $\dot{I} = 6{,}2 + j\,6{,}4$ А; $I = 8{,}91$ А.

8. Катушка з актыўным $r = 9$ Ом і індуктыўным $x_L = 40$ Ом супраціўленнямі паралельна злучана з кандэнсатарам ёмістасцю $C = 15$ мкФ і падключана ў сетку пераменнага току з напружаннем $U = 127$ В. Вызначыць модулі токаў у галінах паралельнага злучэння і ў неразгалінаваным участку ланцуга, зрух фаз паміж токам і напружаннем у неразгалінаваным участку ланцуга пры частаце току $f = 50$ Гц.

А д к а з: $I_1 = 3{,}096$ А; $I_2 = 0{,}5985$ А; $I = 2{,}518$ А; $\varphi = 74{,}33°$.

9. Ланцуг пераменнага току складаецца з дзвюх паралельных галін, актыўныя і рэактыўныя супраціўленні якіх: $r_1 = 5$ Ом; $x_{C1} = 7$ Ом; $r_2 = 6$ Ом; $x_{L2} = 8$ Ом. Напружанне на клемах ланцуга $U = 220$ В. Вызначце комплексныя токі і модулі токаў у галінах, модуль току ў неразгалінаванай частцы ланцуга, $\cos\varphi$ у ланцугу.

А д к а з: $\dot{I}_1 = 14{,}86 + j\,20{,}81$ А; $I_1 = 25{,}57$ А; $\dot{I}_2 = 13{,}2 - j\,17{,}6$ А; $I_2 = 22$ А; $\dot{I} = 28{,}06 + j\,3{,}21$ А; $I = 28{,}25$ А; $\cos\varphi = 0{,}993$.

10. Прымальнік мае актыўнае супраціўленне $r = 11$ Ом і індуктыўнасць $L = 53{,}3$ мГн. Напружанне на клемах прымальніка $U = 220$ В, частата $f = 50$ Гц. Якой ёмістасці кандэнсатар трэба падключыць паралельна прымальніку, каб зрух фаз паміж токам і напружаннем у прымальніку стаў роўным нулю?

А д к а з: $C = 132{,}9$ мкФ.

11. Электрычны ланцуг (рыс. 1.15) падключаны ў сетку з напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц. Супраціўленні элементаў ланцуга адпаведна роўныя: $r_1 = 10$ Ом; $x_{L1} = 50$ Ом; $r_2 = 20$ Ом; $x_{C2} = 20$ Ом; $r_3 = 10$ Ом; $x_{L3} = 30$ Ом. Вызначце комплексны ток і модуль току ў неразгалінаванай частцы ланцуга, комплексныя напружанні і модулі напружанняў на ўчастках AB і BC ланцуга, комплексныя токі і модулі токаў у галінах, $\cos\varphi$ у ланцугу.

А д к а з: $\dot{I} = 1{,}917 - j\,2{,}725$ А; $I = 3{,}332$ А; $\dot{U}_{AB} = 155{,}4 + j\,68{,}6$ В; $U_{AB} = 169{,}9$ В; $\dot{U}_{BC} = 64{,}58 - j\,68{,}63$ В; $U_{BC} = 94{,}24$ В; $\dot{I}_2 = 3{,}33 - j\,0{,}1013$ А; $I_2 = 3{,}332$ А; $\dot{I}_3 = -1{,}413 - j\,2{,}624$ А; $I_3 = 2{,}98$ А; $\cos\varphi = 0{,}575$.

1.9. Рэзананс у электрычных ланцугах

Калі падключыць ланцуг, у якім паслядоўна злучаны рэзістар, катушка індуктыўнасці і кандэнсатар, у сетку пераменнага току, то ў ланцугу могуць узнікнуць электрычныя ваганні. Пры малым актыўным супраціўленні і роўнасці вуглавых частот $\omega = \omega_0$ (ω — частата падведзенага напружання, ω_0 — уласная частата электрычнага ланцуга) узнікае рэзкае ўзрастанне амплітуды вагання току — электрычны рэзананс.

Пры $\omega = \omega_0$, дзе $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, можам запісаць $\omega = 1/\sqrt{LC}$ або $\omega L = 1/(\omega C)$. Гэта значыць, $x_L = x_C$ або $x_L - x_C = 0$.

Такім чынам, электрычны рэзананс узнікае ў ланцугу пры $x_L = x_C$ або пры рэактыўным супраціўленні, роўным нулю. З формулы

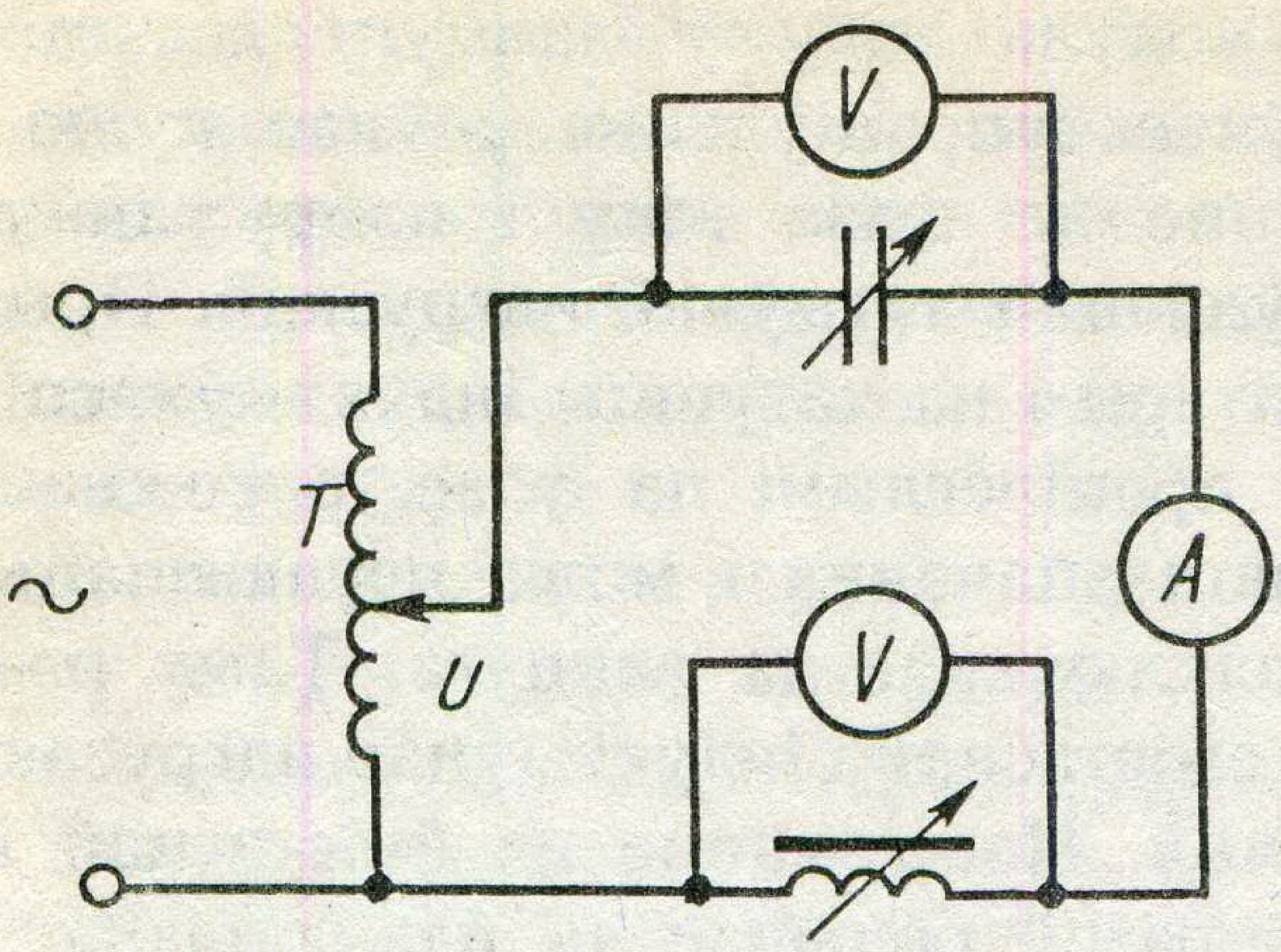
$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{r}$$

бачна, што пры рэзанансе модуль току ў ланцугу дасягае максімальнага значэння, рэактыўнае супраціўленне роўнае нулю, $\cos\varphi = 1$, што азначае супадзенне па фазе току і напружання ($\varphi = 0$). Электрычны ланцуг з'яўляецца актыўнай нагрузкай. Пры рэзанансе напружанні на кандэнсатары і на катушцы індуктыўнасці акажуцца роўнымі па значэнні і процілеглымі па фазе, а кожнае з іх паасобку дасягае максімальнага значэння і можа перавышаць у некалькі разоў напружанне, падключанае да ланцуга. Таму рэзананс пры паслядоўным злучэнні ёмістаснай і індуктыўнай нагрузак называецца *рэзанансам напружання.* Напружанне на ёмістаснай і індуктыўнай нагрузках у столькі разоў большае за падключанае, у колькі разоў рэактыўнае супраціўленне большае за актыўнае супраціўленне ланцуга:

$$U_C = x_C I = x_C(U/r) = (x_C/r)\,U\,;$$
$$U_L = x_L I = x_L(U/r) = (x_L/r)\,U\,.$$

Рэжым рэзанансу напружання ў тэхніцы моцных токаў можа быць аварыйным, бо пры гэтым напружанні ізаляцыя катушкі і кандэнсатара можа быць прабіта. У радыётэхніцы рэзананс напружання выкарыстоўваецца для ўзмацнення напружання. Велічыня, якая паказвае, у колькі разоў пры рэзанансе напружанне на ёмістасці або індуктыўнасці большае за напружанне, падключанае да ланцуга, называецца *дабротнасцю контуру* і абазначаецца $Q = U_{Lp}/U$. Пры памяншэнні актыўнага супраціўлення контуру паляпшаюцца дабротнасць контуру і яго выбіральнасць. У рэжыме рэзанансу $\omega_p L = 1/(\omega_p C) > r$. Калі падставім значэнне $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$ у гэтую няроўнасць, атрымаем $L/\sqrt{LC} = \sqrt{L/C} > r$. Велічыня $\sqrt{L/C} = \rho$ мае вымернасць супраціўлення і называецца *хвалевым супраціўленнем контуру.* Падставім у формулу дабротнасці контуру $U_{Lp} = \rho I$ і $U = rI$, атрымаем $Q = \rho/r$. Такім чынам, дабротнасць контуру роўная стасунку хвалевага супраціўлення да супраціўлення рэзістыўнага элемента і вызначае рэзанансныя якасці контуру. Пры дадзенай частаце ω падведзенага напружання рэзананс напружання можна атрымаць шляхам змянення ёмістасці C або індуктыўнасці ланцуга L так, каб $\omega L = 1/(\omega C)$. Рэзананс напружання можна атрымаць пры пастаянных L і C ланцуга шляхам змянення частаты напружання. Вуглавая частата ω, пры якой наступае рэзананс, называецца *рэзананснай вуглавой частатой контуру.*

Для дэманстрацыі рэзанансу напружання можна сабраць электрычны ланцуг з ЛАТра, батарэі кандэнсатараў, катушкі індуктыўнасці (школьны трансфарматар), амперметра і двух вальтметраў (рыс. 1.16). Установім аўтатрансфарматарам напружанне 40—50 В, а на батарэі кандэнсатараў 25—35 мкФ і будзем змяняць індук-

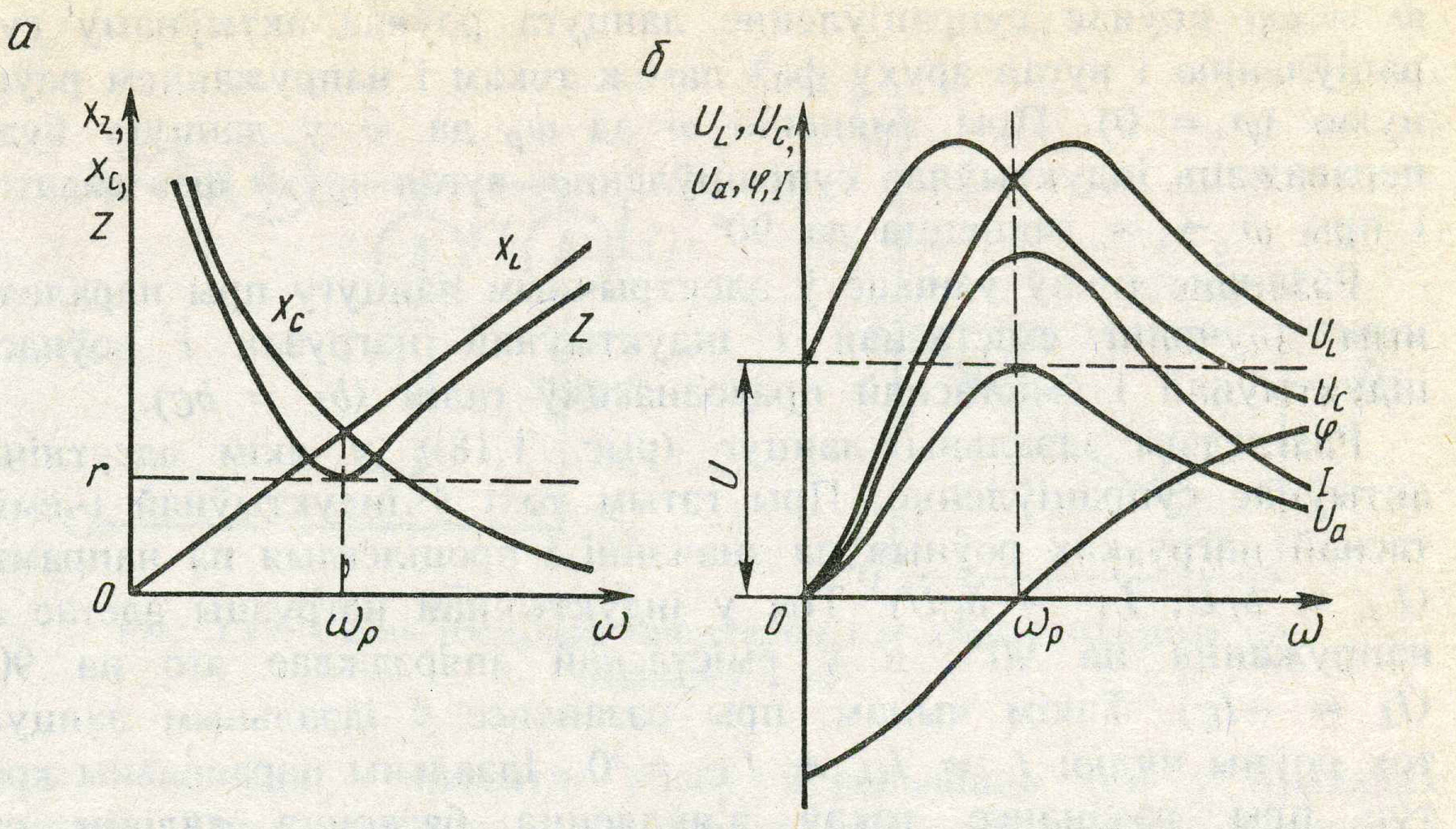


Рыс. 1.16. Схема электрычнага ланцуга для дэманстрацыі рэзанансу напружання

тыўнасць катушкі шляхам ссоўвання стрыжня трансфарматара. Адзначаем найбольшае значэнне току ў ланцугу, якое адпавядае рэзанансу напружання ў ланцугу. Далейшае памяншэнне x_L прыводзіць да памяншэння току ў ланцугу, што паказвае стрэлка амперметра. Са змяненнем току ў ланцугу адпаведна змяняюцца і напружанні на батарэі кандэнсатараў і катушцы індуктыўнасці.

Рэзананс напружання можна атрымаць таксама шляхам змянення ёмістасці батарэі кандэнсатараў пры пастаяннай індуктыўнасці катушкі. Падзенне напружання на ёмістасці і індуктыўнасці пры рэзанансе у некалькі разоў перавышае напружанне, падключанае да ланцуга. Здавалася б, напружанне на ўчастках ланцуга пры паслядоўным злучэнні не павінна перавышаць падведзенага. Гэты закон справядлівы і пры рэзанансе, аднак трэба мець на ўвазе не арыфметычную, а геаметрычную суму напружанняў асобных участкаў ланцуга. Паколькі напружанне на індуктыўным супраціўленні апярэджвае ток па фазе на 90°, а на ёмістасным адстае на 90°, то гэтыя напружанні проціфазныя і пры рэзанансе кампенсуюцца. Падведзенае напружанне прыходзіцца на актыўнае супраціўленне ланцуга, гэтым і тлумачыцца той факт, што зрух фаз паміж токам і напружаннем пры рэзанансе роўны нулю. Пры рэзанансе паміж кандэнсатарам і катушкай індуктыўнасці адбываецца абмен энергіямі, бо напружанні U_C і U_L роўныя па модулю і зрушаны па фазе на 180°. Пры гэтым імгненныя значэнні маюць процілеглыя знакі ($U_L = -U_C$), гэта значыць, што памяншэнне энергіі электрычнага поля кандэнсатара прыводзіць да павелічэння энергіі магнітнага поля катушкі індуктыўнасці, і наадварот. Спажыванне энергіі ў актыўным супраціўленні папаўняецца крыніцай электрычнага току.

Змяненне частаты напружання прыводзіць да змянення велічынь x_L, x_C, I, U_L, U_C, U_a і φ (рыс. 1.17, *а, б*). Пры $\omega = 0$ рэактыўныя супраціўленні (індуктыўнае і ёмістаснае) будуць адпаведна роўныя: $x_L = 0$; $x_C = \infty$. З павелічэннем ω індуктыўнае супраціўленне будзе лінейна расці, што на графіку абазначаецца прамой, якая выходзіць з пачатку каардынат, а ёмістаснае будзе памяншацца паводле закону адваротнай функцыі ($x_C = 1/(\omega C)$).



Рыс. 1.17. Графікі залежнасці супраціўленняў, току і напружанняў ад частаты току: *а* — графік супраціўленняў; *б* — графікі току, напружанняў і зруху фаз паміж токам і напружаннем

Пры ω_p абодва гэтыя супраціўленні будуць роўныя адзін аднаму па абсалютным значэнні. Поўнае супраціўленне ланцуга на графіку паказана крывой Z.

Пры $\omega = 0$ ток I таксама будзе роўны нулю, бо $x_C = \infty$. З павелічэннем ω ток будзе расці і дасягне максімальнага значэння пры ω_p. Далейшае павелічэнне ω прыводзіць да памяншэння току, бо індуктыўнае супраціўленне ўзрастае ў большай ступені, чым памяншаецца ёмістаснае. На графіку змяненне току паказана крывой I (рыс. 1.17, *б*).

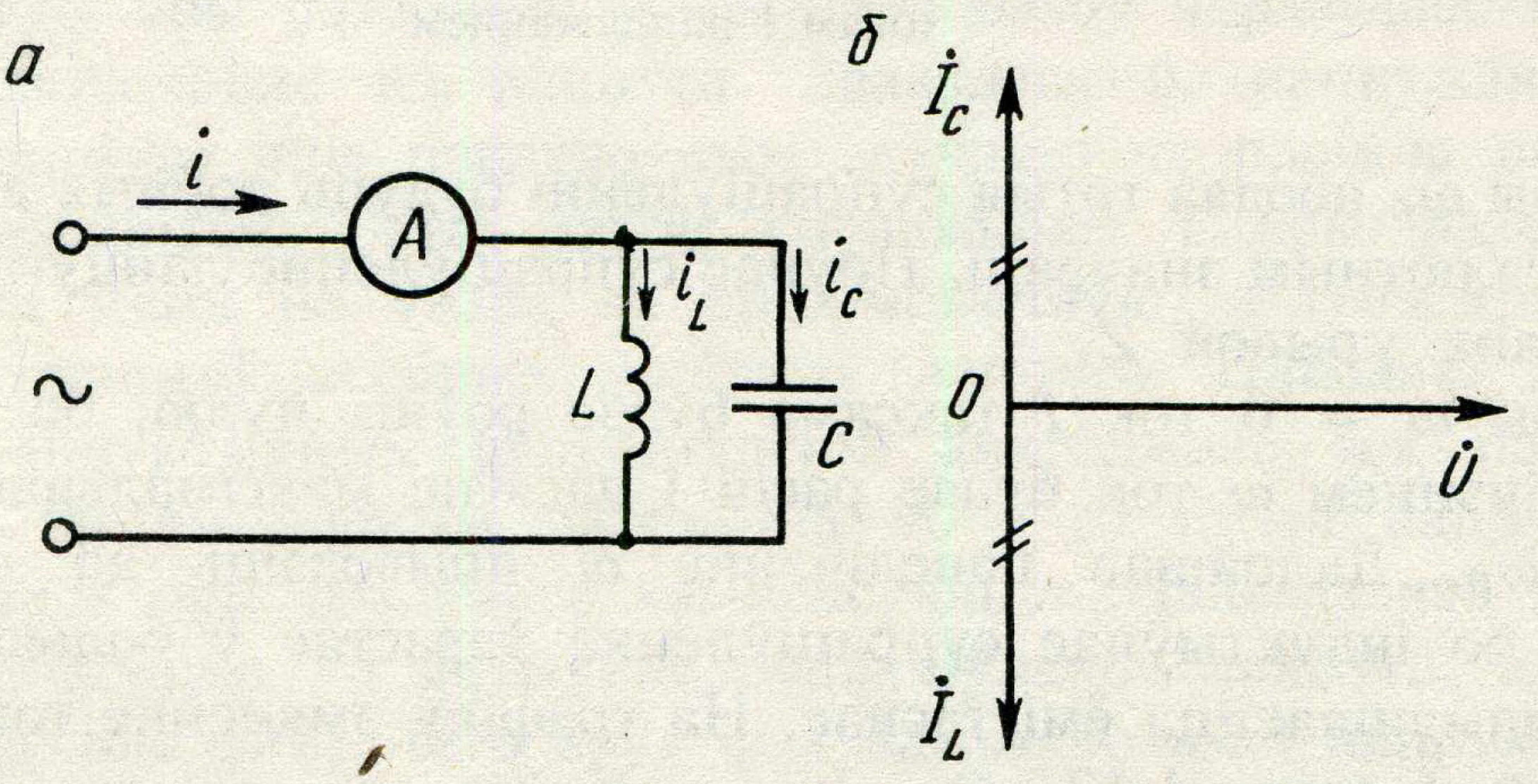
Пры $\omega = 0$ напружанні U_L і U_C будуць адпаведна роўныя: $U_L = 0$, а $U_C = U$ — падведзенаму напружанню, бо пры $\omega = 0$ $x_C = \infty$, а $x_L = 0$. З павелічэннем ω абодва напружанні будуць расці і дасягнуць максімумаў: U_C — пры вуглавой частаце, меншай за рэзанансную, а U_L — пры частаце, большай за рэзанансную. Гэта можна бачыць на рыс. 1.17, *а*, калі прадставім ардынаты напружанняў як здабытак ардынат току і супраціўлення ($U_C = x_C I$ і $U_L = x_L I$).

Далейшае павелічэнне ω прыводзіць да памяншэння напружання на рэактыўных супраціўленнях. Падзенне напружання на актыўным супраціўленні ($U_a = rI$) змяняецца ў адпаведнасці са змяненнем току ў ланцугу і паказана на графіку крывой U_a. Вугал зруху фаз паміж токам і напружаннем пры змяненні ω ад нуля да ω_p з'яўляецца адмоўным, бо ў ланцугу пераважае ёмістаснае супраціўленне і пры $\omega = 0$ вугал $\varphi = -90°$. Пры

$\omega = \omega_0$ поўнае супраціўленне ланцуга роўнае актыўнаму супраціўленню і вугал зруху фаз паміж токам і напружаннем роўны нулю ($\varphi = 0$). Пры змяненні ω ад ω_p да ∞ у ланцугу будзе пераважаць індуктыўнае супраціўленне, вугал зруху фаз дадатны і пры $\omega \to \infty$ імкнецца да 90°.

Рэзананс токаў узнікае ў электрычным ланцугу пры паралельным злучэнні ёмістаснай і індуктыўнай нагрузак і роўнасці індуктыўнай і ёмістаснай праводнасцяў галін ($b_L = b_C$).

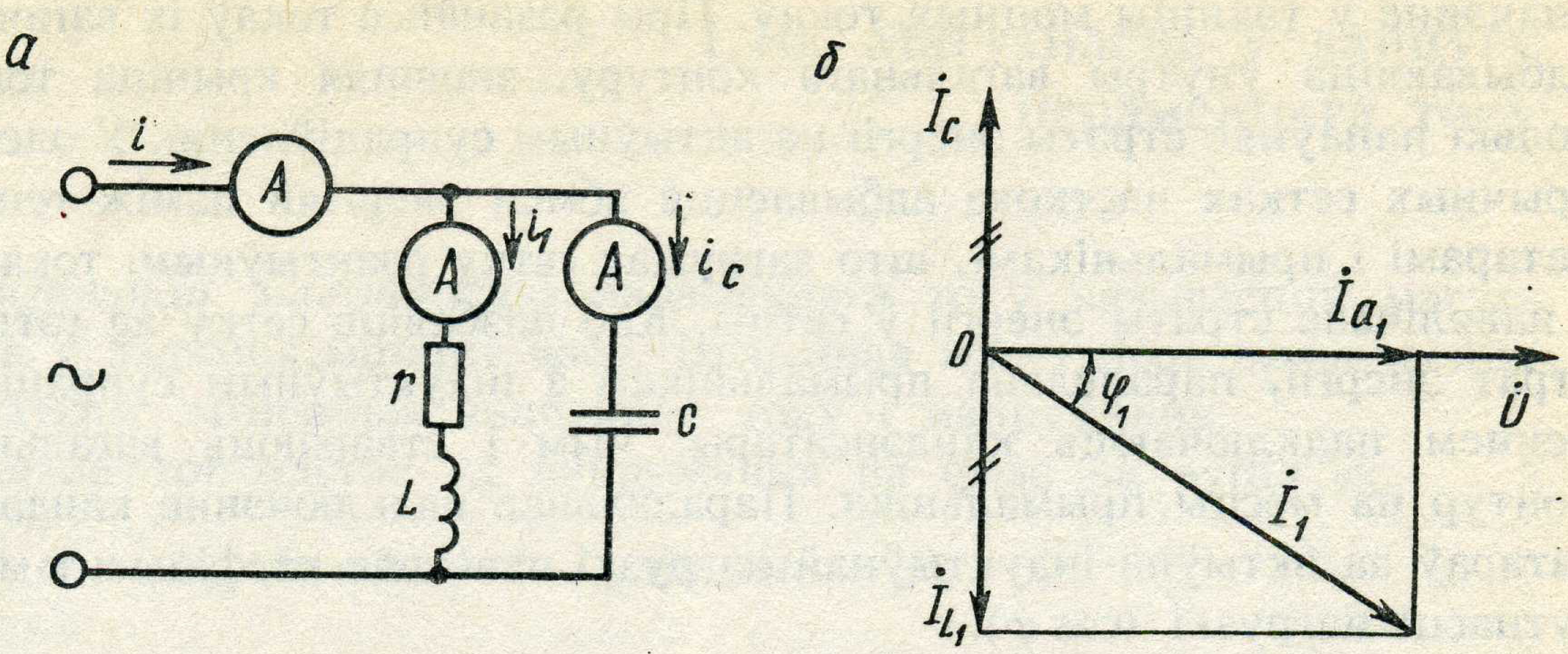
Разгледзім ідэальны ланцуг (рыс. 1.18), у якім адсутнічае актыўнае супраціўленне. Пры гэтым токі ў індуктыўнай і ёмістаснай нагрузках роўныя па значэнні і процілеглыя па напрамку ($\dot{I}_L = b_L\dot{U}$; $\dot{I}_C = b_C\dot{U}$). Ток у індуктыўнай нагрузцы адстае ад напружання на 90°, а ў ёмістаснай апярэджвае яго на 90° ($\dot{I}_L = -\dot{I}_C$). Такім чынам, пры рэзанансе ў ідэальным ланцугу ток роўны нулю: $\dot{I} = \dot{I}_L + \dot{I}_C = 0$. Ідэальны паралельны контур пры рэзанансе токаў з'яўляецца бясконца вялікім супраціўленнем.



Рыс. 1.18. Схема ідэальнага ланцуга (*а*) і вектарная дыяграма (*б*) рэзанансу току

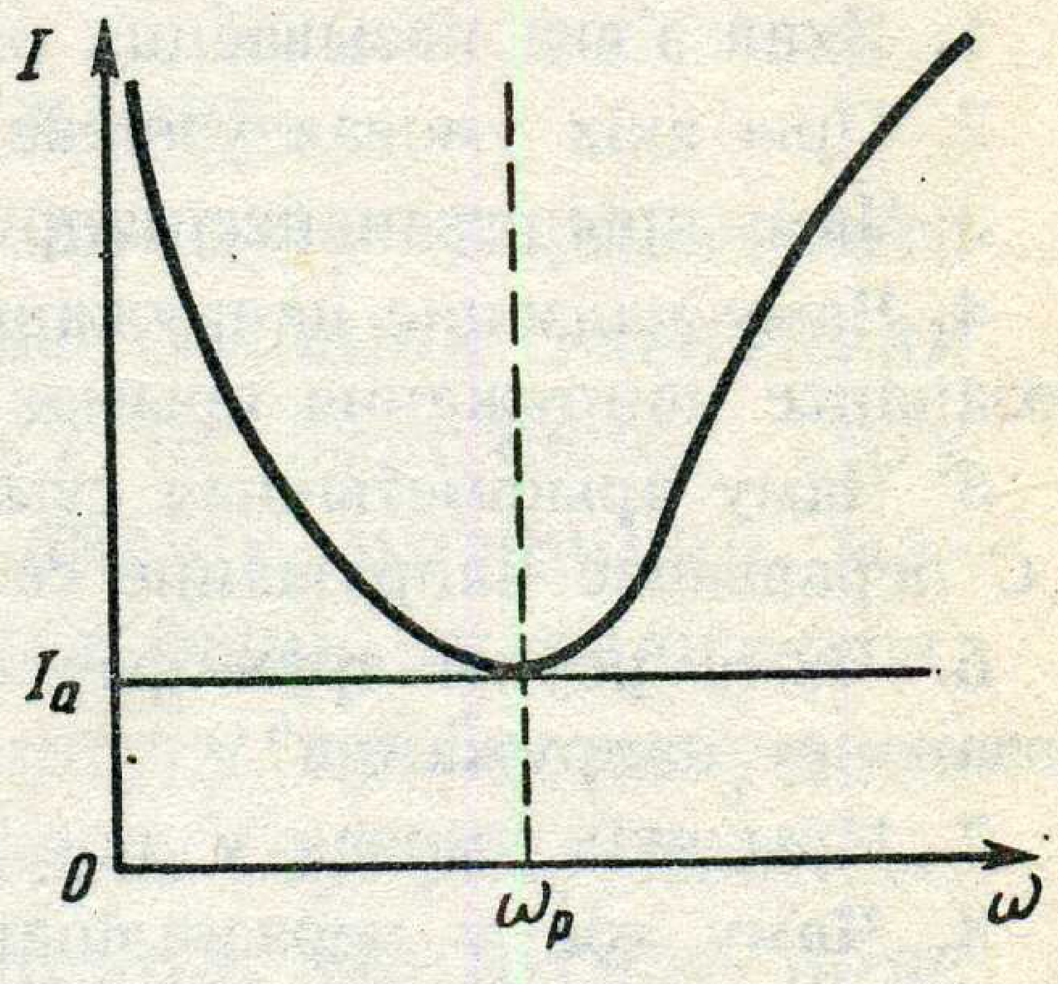
Разгледзім цяпер рэальны ланцуг (рыс. 1.19, *а*). Няхай у галіне з індуктыўным супраціўленнем ёсць і актыўнае супраціўленне, што практычна адпавядае падключэнню рухавіка. У галіне з ёмістасным супраціўленнем ток вызначыцца паводле формулы $\dot{I}_C = jb_C\dot{U}$. У галіне з індуктыўным супраціўленнем, ток $\dot{I}_1 = Y_1\dot{U}$ складаецца з актыўнай састаўляльнай $\dot{I}_{a1} = g_1\dot{U}$ і індуктыўнай састаўляльнай $\dot{I}_{L1} = -jb_1\dot{U}$ (рыс. 1.19, *б*). У рэжыме рэзанансу індуктыўная састаўляльная току ($\dot{I}_{L1} = -jb_1\dot{U}$) першай галіны роўная па значэнні і процілеглая па напрамку току ў другой галіне: $\dot{I}_{L1} = -\dot{I}_C$.

Ток у провадзе будзе складацца толькі з актыўнай састаўляльнай току ланцуга ($\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_{L1} + \dot{I}_C = \dot{I}_a$). Пры паралельным рэзанансе токаў рэактыўныя токі замыкаюцца ў паралельным кон-



Рыс. 1.19. Схема рэальнага ланцуга (*а*) і вектарная дыяграма (*б*) рэзанансу току

туры і могуць у дзесяткі разоў перавышаць ток у правадах ланцуга. Таму рэзананс пры паралельным злучэнні ёмістаснай і індуктыўнай нагрузак называецца *рэзанансам токаў.* Пры рэзанансе токаў зрух паміж токам і напружаннем у ланцугу роўны нулю ($\cos\varphi = 1$), ланцуг мае актыўнае супраціўленне. Вектарная дыяграма токаў і напружання пры рэзанансе токаў паказана на рыс. 1.19, *б.* Ток у правадах ланцуга прымае мінімальнае значэнне (рыс. 1.20).



Рыс. 1.20. Графік залежнасці току ад частаты пры паралельным злучэнні ёмістаснай і індуктыўнай нагрузак

Для дэманстрацыі рэзанансу збіраем электрычны ланцуг з паралельным злучэннем батарэі кандэнсатараў і катушкі індуктыўнасці (гл. рыс. 1.19). Змяняем ёмістасць батарэі кандэнсатараў пры пастаяннай індуктыўнасці катушкі або індуктыўнасць пры пастаяннай ёмістасці, дамагаемся мінімальнага паказання амперметра, які ўключаны ў неразгалінаваную частку ланцуга, што адпавядае рэзанансу току.

Амперметры, уключаныя ў галіны ланцуга, пакажуць максімальныя токі. Значэнне ёмістасці C пры рэзанансе ў ланцугу можна вызначыць наступным чынам. Пры ўмовах рэзанансу $|I_C| = |I_{L1}|$, дзе $\dot I_C = b_C\dot U = \omega C\dot U$, а $\dot I_{L1} = b_{L1}\dot U = \omega L/(r^2 + \omega^2L^2)\dot U$, або $\omega L/(r^2 + \omega^2L^2) = \omega C$. Адсюль $C = L/(r^2 + \omega^2L^2)$. Рэзанансная частата $\omega_p = 1/\sqrt{LC}\sqrt{1 - \frac{r^2C}{L}}$, пры $r = 0$ $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$. Рэжым рэзанансу токаў мае вялікае практычнае

4. Зак 5287

значэнне ў тэхніцы моцных токаў. Пры рэзанансе токаў іх ваганні адбываюцца ўнутры вагальнага контуру, знешняя крыніца току толькі папаўняе страты энергіі на актыўным супраціўленні. У электрычных сетках часткова адбываецца абмен энергіяй паміж генератарамі і прымальнікамі, што загружае сетку рэактыўнымі токамі і павялічвае страты энергіі ў сетцы. Каб пазбавіць сетку ад гэтых страт энергіі, паралельна прымальнікам з індуктыўным супраціўленнем падключаюць кандэнсатары, чым і ствараюць вагальны контур на месцы прымальніка. Паралельнае падключэнне кандэнсатараў да актыўна-індуктыўнай нагрузкі павышае каэфіцыент магутнасці нагрузкі ($\cos\varphi$).

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Якая з'ява называецца рэзанансам напружання?

2. Пры якіх умовах узнікае рэзананс напружання?

3. Чаму пры рэзанансе напружання ток у ланцугу прымае максімальнае значэнне?

4. Чаму падзенне напружання на ёмістасным і індуктыўным супраціўленнях пры рэзанансе напружання прымае максімальнае значэнне?

5. Чаму арыфметычная сума напружанняў на асобных участках ланцуга з L, r і C перавышае напружанне сеткі?

6. Чаму роўны зрух фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу ў рэжыме рэзанансу напружання?

7. Пры якіх умовах у ланцугу ўзнікае рэзананс току?

8. Чаму ток у неразгалінаванай частцы ланцуга пры рэзанансе току прымае мінімальныя значэнні?

9. Кандэнсатар ёмістасцю $C = 50$ мкФ і дросель з актыўным супраціўленнем $r = 11$ Ом злучаны паслядоўна і падключаны ў сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц. Якой індуктыўнасці павінен быць дросель, каб у ланцугу ўзнік рэзананс? Чаму роўны ток у ланцугу?

А д к а з: $L = 202{,}6$ мГн; $I = 20$ А.

10. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц уключаны асінхронны рухавік, які працуе пры $\cos\varphi = 0{,}866$ і току 40 А. Якой ёмістасці кандэнсатар патрэбна падключыць паралельна рухавіку, каб скампенсаваць зрух фаз паміж токам і напружаннем ($\varphi = 0$, а $\cos\varphi = 1$)?

А д к а з: $C = 289{,}5$ мкФ.

11. У сетку пераменнага току з частатой $f = 50$ Гц паралельна падключаны: актыўнае супраціўленне $r = 20$ Ом, катушка індуктыўнасці і кандэнсатар. Вызначце ёмістасць кандэнсатара, індуктыўнасць катушкі, ток у неразгалінаванай частцы ланцуга, калі ў рэжыме рэзаанансу ток у актыўным супраціўленні роўны $I_a = 5$ А і ў кандэнсатары $I_C = 5$ А. Актыўнае супраціўленне катушкі не ўлічваць.

А д к а з: $C = 159{,}15$ мкФ, $L = 63{,}66$ мГн, $I = 5$ А.

1.10. Магутнасць у ланцугу пераменнага току

Імгненнай магутнасцю пераменнага току называецца магутнасць у дадзены момант часу. Імгненная магутнасць вызначаецца здабыткам імгненных значэнняў току і напружання.

Няхай ток адстае ад напружання па фазе на вугал φ:

$$u = U_m \sin \omega t; \quad i = I_m \sin (\omega t - \varphi).$$

Тады імгненная магутнасць пераменнага току

$$p = iu = I_m U_m \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) =$$

$$= \frac{I_m U_m}{2} [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)] =$$

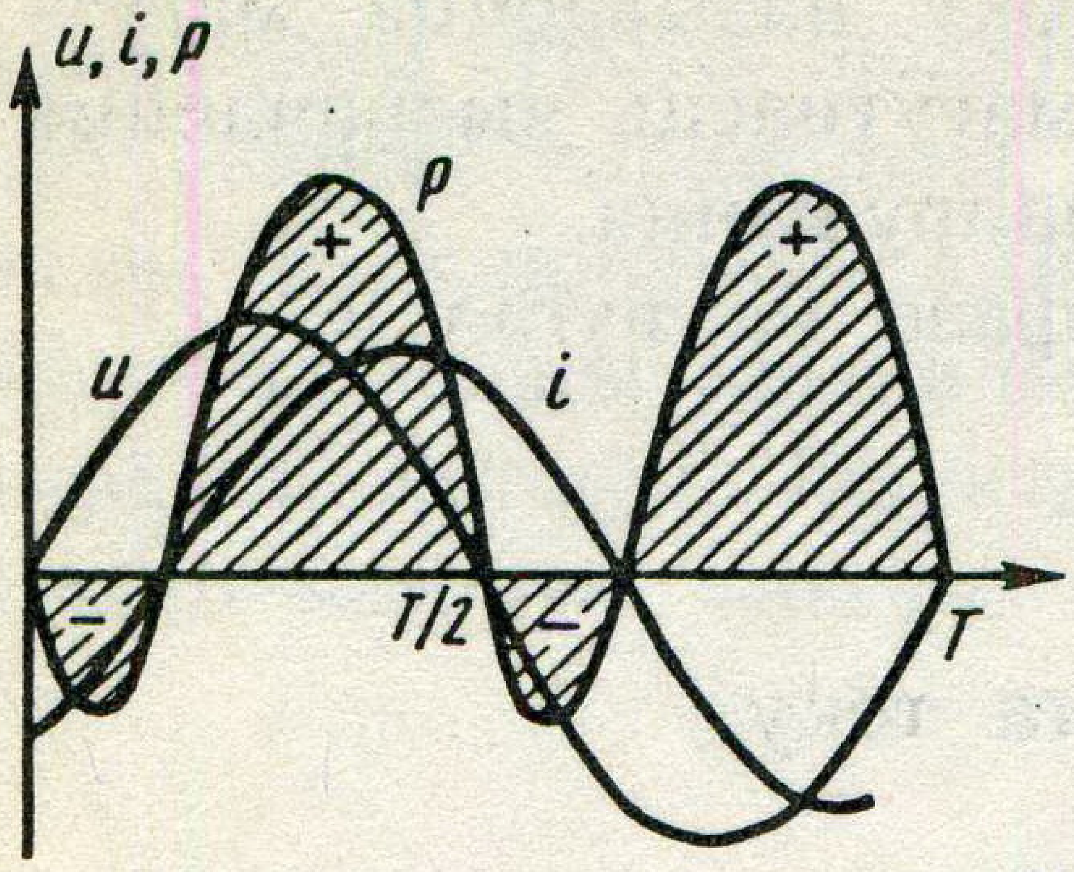
$$= IU \cos \varphi - IU \cos (2\omega t - \varphi), \tag{1.9}$$

дзе I і U — дзейныя значэнні току і напружання.

Такім чынам, імгненная магутнасць у ланцугу пераменнага току выражаецца двума складнікамі. Першы складнік імгненнай магутнасці — велічыня пастаянная і ад часу не залежыць. Гэту магутнасць называюць *актыўнай.* Другі складнік імгненнай магутнасці змяняецца з двайной частатой і можа быць як дадатным, так і адмоўным. Змяненне магутнасці ў ланцугу трэба разумець наступным чынам. У ланцугу з індуктыўным супраціўленнем, першую чвэрць перыяду, калі ток павялічваецца, магнітнае поле таксама расце і частка энергіі крыніцы току ператвараецца ў энергію магнітнага поля ланцуга. У момант часу $t = 1/4\,T$ энергія магнітнага поля ланцуга будзе мець найбольшае значэнне $W = LI_m^2/2$. Такі напрамак патоку энергіі, калі яна паступае ад крыніцы току ў ланцуг, называецца *дадатным,* і імгненная магутнасць, якая характарызуе хуткасць паступлення энергіі будзе дадатнай.

У другую чвэрць перыяду, калі ток памяншаецца ад максімуму да нуля, магнітнае поле, а разам з ім і энергія магнітнага поля таксама памяншаюцца да нуля. У гэты час энергія магнітнага поля з ланцуга вяртаецца да крыніцы току, што адпавядае адмоўнаму напрамку перадачы энергіі і адмоўнай імгненнай магутнасці. Такім чынам, за палавіну перыяду вагання току ў ланцугу энергія робіць поўны цыкл пераўтварэнняў, што адпавядае двайной частаце змянення энергіі і магутнасці ў параўнанні з

частатой току ў ланцугу. Аналагічны працэс адбываецца пры наяўнасці ў ланцугу ёмістасці. У гэтым выпадку замест энергіі магнітнага поля змяняецца энергія электрычнага поля кандэнсатара з максімальнай энергіяй $W = CU_m^2/2$.



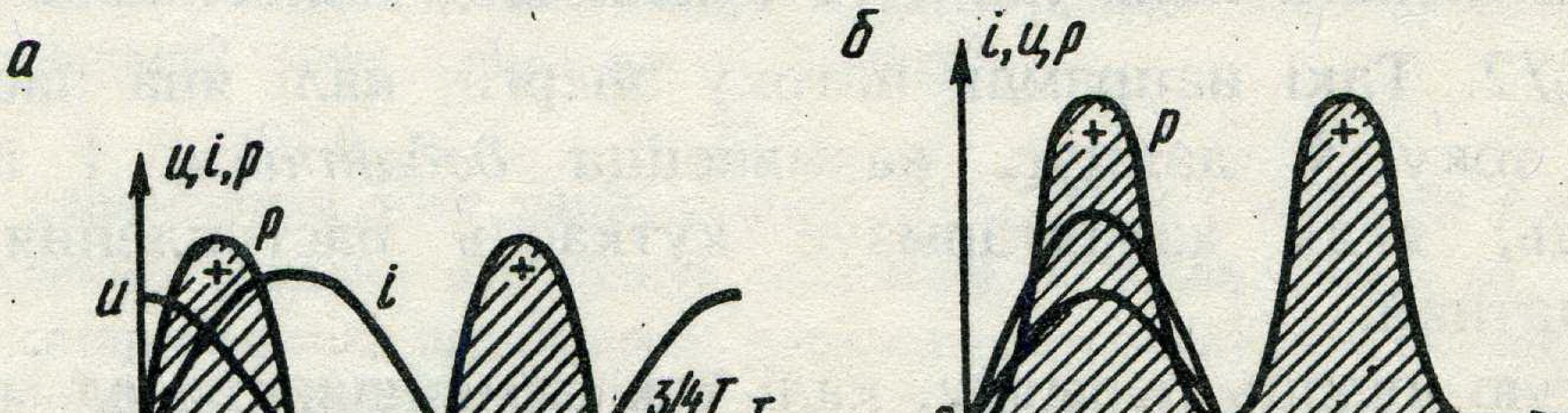
Рыс. 1.21. Графік імгненнай магутнасці ланцуга пры актыўна-рэактыўнай нагрузцы

Такім чынам, другі складнік магутнасці звязаны з наяўнасцю рэактыўнага супраціўлення ў ланцугу і яго называюць *рэактыўнай магутнасцю.* Рэактыўная магутнасць вызначае хуткасць абарачальнага працэсу абмену энергіямі паміж крыніцай току і рэактыўнымі прымальнікамі. Актыўная магутнасць вызначае хуткасць пераўтварэння электрычнай энергіі ў другія віды энергіі (светлавую, механічную, хімічную, унутраную). Графік імгненнай магутнасці пры наяўнасці актыўнага і рэактыўнага супраціўленняў у ланцугу паказаны на рыс. 1.21. Калі ланцуг складаецца з чыста рэактыўнага супраціўлення ($\varphi = 90$), раўнанне (1.9) будзе мець выгляд:

$$p = IU\cos 90° - IU\cos(2\omega t - 90°).$$

У гэтым выпадку актыўная магутнасць роўная нулю і ў ланцугу будзе толькі рэактыўная магутнасць. Графік імгненнай магутнасці пры чыста рэактыўнай нагрузцы паказаны на рыс. 1.22, *а.*

З раўнання (1.9) і графіка (гл. рыс. 1.21) відаць, што чым меншы зрух фаз паміж токам і напружаннем, чым меншая рэактыўная нагрузка ў ланцугу, тым меншая адмоўная магутнасць.



Рыс. 1.22. Графікі імгненнай магутнасці:

а — пры індуктыўнай нагрузцы; *б* — пры актыўнай нагрузцы

Пры наяўнасці ў ланцугу толькі актыўнай нагрузкі ($\varphi = 0$) раўнанне будзе мець выгляд:

$$p = IU \cos 0° - IU \cos (2\omega t - 0°) = IU - IU \cos 2\omega t.$$

Атрымаем пульсуючую з двайной частатой магутнасць (рыс. 1.22, *б*). Гэта магутнасць увесь час з'яўляецца дадатнай, што адпавядае пераўтварэнню ў ланцугу ўсёй электрычнай энергіі ў іншыя віды энергіі.

У ланцугу пераменнага току звычайна трэба ведаць сярэднюю магутнасць за перыяд:

$$P_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T p dt = \frac{1}{T}\int_0^T (IU \cos\varphi - IU \cos (2\omega t - \varphi))\, dt =$$

$$= IU \cos\varphi\,.$$

Сярэдняя магутнасць за перыяд з'яўляецца актыўнай:

$$P = IU \cos\varphi \text{ або } P = IU_a = rI_a^2;\ P = UI_a = U^2 g.$$

Актыўная магутнасць вымяраецца ў ватах (Вт), гектаватах (гВт) і кілаватах (кВт) (1 кВт = $1\cdot 10^3$ Вт; 1 гВт = $1\cdot 10^2$ Вт). У далейшым сярэднюю магутнасць будзем называць актыўнай магутнасцю пераменнага току. Гэта магутнасць залежыць не толькі ад значэння току і напружання, але і ад множніка $\cos\varphi$, які называецца *каэфіцыентам магутнасці.*

У адрозненне ад пастаяннага току, калі магутнасць вызначаецца здабыткам току і напружання, у ланцугу пераменнага току здабытак IU называецца поўнай магутнасцю, якая абазначаецца: $S = IU$. Поўная магутнасць у адрозненне ад актыўнай вымяраецца ў вольт-амперах (В·А) і кілавольт-амперах (кВ·А).

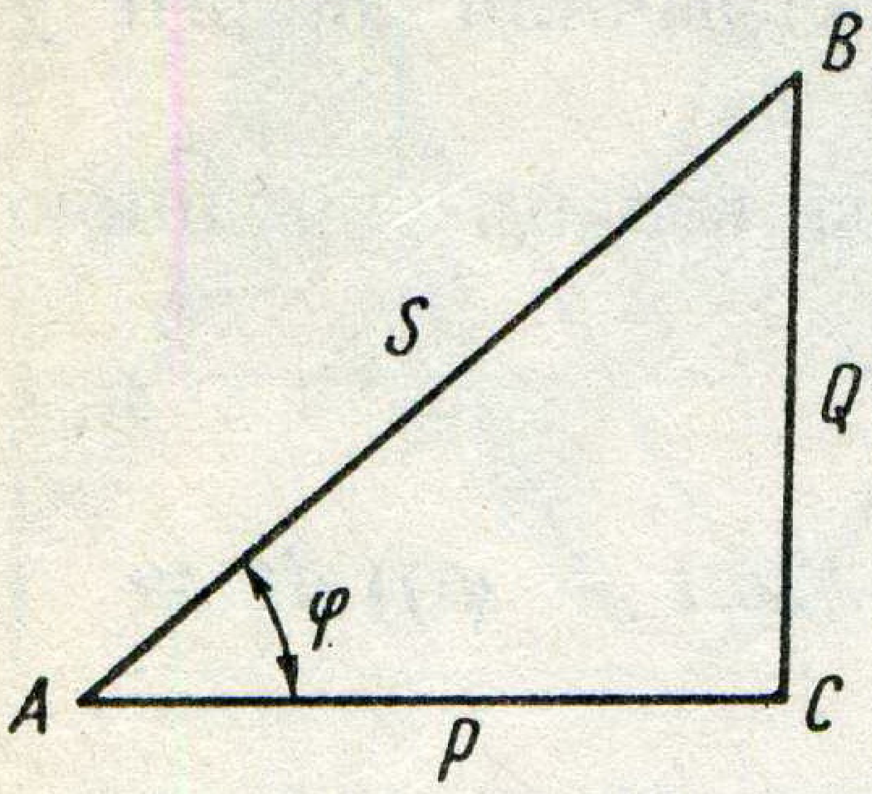
Каэфіцыент магутнасці ($\cos\varphi$) паказвае, якую частку ад поўнай магутнасці складае актыўная магутнасць.

Такім чынам, другой састаўляльнай поўнай магутнасці з'яўляецца рэактыўная магутнасць, якая абазначаецца літарай Q. З формулы поўнай магутнасці ($S = IU$) як сумы актыўнай ($P = IU \cos\varphi$) і рэактыўнай можна запісаць формулу рэактыўнай магутнасці $Q = IU \sin\varphi$. Па аналогіі з формуламі актыўнай магутнасці можна запісаць разліковыя формулы рэактыўнай магутнасці $Q = xI^2$ і $Q = bU^2$. Рэактыўная магутнасць характарызуе сярэднюю хуткасць накаплення і змяншэння энергіі магнітнага або электрычнага поля ланцуга. Рэактыўная магутнасць вымяра-

ецца адзінкамі ВАр і кВАр, што азначае вольт-ампер і кілавольт-ампер рэактыўнай магутнасці. З судачынення магутнасцей маем:

$$P^2 + Q^2 = S^2 \cos^2\varphi + S^2 \sin^2\varphi = S^2 .$$

Адсюль можна ўстанавіць паняцце трохвуголніка магутнасцей (рыс. 1.23). З трохвугольніка магутнасцей можна запісаць:



Рыс. 1.23. Трохвугольнік магутнасцей

$$\cos\varphi = P/S; \ \sin\varphi = Q/S; \ \mathrm{tg}\,\varphi = Q/P .$$

Комплексная магутнасць пераменнага току вызначаецца множаннем комплекснага напружання на спалучаны комплексны ток:

$$\tilde{S} = \dot{U}I^* = Ue^{j\psi_u}Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} =$$

$$= Se^{j\varphi} = S\cos\varphi + jS\sin\varphi = P + jQ .$$

Рэчаісная частка комплекснай поўнай магутнасці пераменнага току вызначае актыўную магутнасць, а ўяўная — рэактыўную. Актыўная магутнасць у ланцугу пераменнага току вымяраецца ватметрам. Поўная магутнасць вызначаецца здабыткам паказанняў вальтметра і амперметра.

Каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi$ мае вялікае практычнае значэнне. Павелічэнне $\cos\varphi$ дае магчымасць больш поўна выкарыстаць намінальную магутнасць генератара, трансфарматара і іншага абсталявання. Напрыклад, намінальная поўная магутнасць трансфарматара роўная 2 000 кВ·А пры напружанні 10 кВ. Правады разлічаны на ток 200 А. Пры каэфіцыенце магутнасці прыёмніка 0,9 актыўная магутнасць $P = 10 \cdot 200 \cdot 0{,}9 = 1\,800$ кВт, што складае 90 % намінальнай магутнасці трансфарматара без уліку страты энергіі ў трансфарматары і ў лініі электраперадачы. Пры $\cos\varphi = 0{,}7$ актыўная магутнасць $P = 10 \cdot 200 \cdot 0{,}7 = 1\,400$ кВт, што складае толькі 70 % намінальнай магутнасці трансфарматара, і ўсё абсталяванне выкарыстоўваецца на 70 % сваёй намінальнай магутнасці.

Недагрузка абсталявання (генератараў, турбін, трансфарматараў) вядзе да залішніх матэрыяльных затрат і эканамічна нявыгадная. Апрача гэтага, недагрузка генератараў, рухавікоў і трансфарматараў прыводзіць да павелічэння непатрэбнай рэактыўнай магутнасці ў ланцугу. Павелічэнне $\cos\varphi$ павышае ККД устаноўкі. З папярэдняга прыкладу бачна, што цеплавыя і іншыя страты ў першым і другім выпадках аднолькавыя (ΔP), бо ток

у сетцы аднолькавы, ККД у першым выпадку большы, чым у другім:

$$\eta_1 = (P_1 - \Delta P)/P_1 \, ; \; \eta_2 = (P_2 - \Delta P)/P_2.$$

Такім чынам, $\eta_1 > \eta_2$. Пры перадачы аднолькавай актыўнай магутнасці, але пры розным каэфіцыенце магутнасці маем:

$$I_1 = P/(U \cos \varphi_1) \text{ і } I_2 = P/(U \cos \varphi_2) \, .$$

Калі $\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2$, то $I_1 < I_2$. Гэта значыць, для перадачы аднолькавай магутнасці пры большым $\cos \varphi$ патрэбны правады меншага сячэння, больш лёгкія апоры, меншыя расход металу і капіталаўкладанні на збудаванне паветраных ліній і ўстаноўку абсталявання. Прыкладна 80 % усёй электраэнергіі выкарыстоўваецца электрарухавікамі. Таму павышэнне каэфіцыента магутнасці энергасістэмы ў асноўным дасягаецца павышэннем $\cos \varphi$ электрарухавікоў. Для гэтага неабходна правільна падбіраць рухавікі, каб іх намінальная магутнасць адпавядала магутнасці механічнай нагрузкі.

Недапушчальная работа рухавіка з недагрузкай і ўхаластую. Пры дадзенай нагрузцы рухавіка павышэнне $\cos \varphi$ можна ажыццявіць шляхам паралельнага падключэння кандэнсатараў.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Якая магутнасць называецца імгненнай магутнасцю пераменнага току?
2. Што вызначае імгненная магутнасць пераменнага току?
3. Напішыце формулу імгненнай магутнасці пераменнага току пры актыўнай нагрузцы і начарціце графік змянення гэтай магутнасці.
4. Напішыце формулу імгненнай магутнасці пераменнага току пры рэактыўнай нагрузцы і начарціце графік змянення гэтай магутнасці за перыяд вагання току ў ланцугу.
5. Як змяняецца энергія ў ланцугу пераменнага току з рэактыўнай нагрузкай?
6. Напішыце формулу імгненнай магутнасці пераменнага току пры актыўна-індуктыўнай нагрузцы ланцуга і начарціце графік змянення яе за час аднаго перыяду вагання току ў ланцугу.
7. Як залежыць значэнне адмоўнай магутнасці ад зруху фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу пераменнага току?
8. Што паказвае актыўная магутнасць у ланцугу пераменнага току? Напішыце формулу актыўнай магутнасці.
9. Што называецца поўнай магутнасцю пераменнага току? Напішыце формулу поўнай магутнасці.
10. Што вызначае рэактыўная магутнасць у ланцугу пераменнага току? Запішыце формулу рэактыўнай магутнасці.

11. Начарціце трохвугольнік магутнасцей і напішыце формулу для вызначэння $\cos\varphi$.

12. Што называецца каэфіцыентам магутнасці ланцуга пераменнага току?

13. Запішыце формулу комплекснай магутнасці ланцуга пераменнага току. Што абазначаюць рэчаісная і ўяўная часткі комплекснай магутнасці?

14. У сетку напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц падключаны рухавік магутнасцю $P = 4{,}8$ кВт, $\cos\varphi = 0{,}6$. Якой ёмістасці кандэнсатар трэба падключыць паралельна рухавіку, каб павысіць каэфіцыент магутнасці да 0,8?

Адказ: $C = 105{,}2$ мкФ.

15. У сетку напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц падключаны рухавік магутнасцю $P = 4{,}62$ кВт, $\cos\varphi = 0{,}84$. Якой ёмістасці кандэнсатар трэба падключыць паралельна рухавіку, каб павысіць каэфіцыент магутнасці да 0,92?

Адказ: $C = 54{,}5$ мкФ.

16. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В уключаны прымальнік, актыўнае супраціўленне якога $r = 4$ Ом, а індуктыўнае $x_L = 3$ Ом. Вызначце комплексны ток, актыўную і рэактыўную часткі току, модуль току, комплексную магутнасць, актыўную і рэактыўную магутнасці прымальніка, каэфіцыент магутнасці.

Адказ: $\dot{I} = 35{,}2 - j26{,}4$ А; $I_a = 35{,}2$ А; $I_p = 26{,}4$ А; $I = 44$ А; $\tilde{S} = 7744 + j5808$ В·А; $P = 7744$ Вт; $Q = 5808$ ВАр; $\cos\varphi = 0{,}8$.

17. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В уключаны паслядоўна: рэастат супраціўленнем $r = 57$ Ом, катушка індуктыўнасці супраціўленнем $x_L = 76{,}3$ Ом і кандэнсатар ёмістаснага супраціўлення $x_C = 155{,}3$ Ом. Вызначце комплекснае супраціўленне ланцуга, комплексны ток у ланцугу, комплекснае напружанне і модуль напружання на кожным супраціўленні, комплексную магутнасць, актыўную і рэактыўную магутнасці ланцуга, $\cos\varphi$.

Адказ: $Z = 97{,}42e^{-j54{,}19^\circ}$ Ом; $\dot{I} = 2{,}258e^{j34{,}19^\circ}$ А; $\dot{U}_r = 128{,}7e^{j54{,}19^\circ}$ В; $U_r = 128{,}7$ В; $\dot{U}_L = 172{,}3e^{j144{,}19^\circ}$ В; $U_L = 172{,}3$ В; $\dot{U}_C = 350{,}7e^{-j35{,}81^\circ}$ В; $U_C = 350{,}7$ В; $\tilde{S} = 496{,}76e^{j54{,}19^\circ}$ В·А; $P = 290{,}7$ Вт; $Q = 402{,}9$ ВАр; $\cos\varphi = 0{,}585$.

18. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В паслядоўна ўключаны два прымальнікі, комплексныя супраціўленні якіх: $Z_1 = 6 + j13$ Ом і $Z_2 = = 9 + j7$ Ом. Вызначце комплексны ток і модуль току ў ланцугу, напружанне на клемах прымальнікаў, комплексную магутнасць, актыўную і рэактыўную магутнасці кожнага прымальніка і ўсяго ланцуга, $\cos\varphi$ ланцуга.

Адказ: $\dot{I} = 8{,}8\,e^{-j53{,}13^\circ}$ А; $I = 8{,}8$ А; $\dot{U}_1 = 126\,e^{j12{,}15^\circ}$ В; $\dot{U}_2 = 100\,e^{-j15{,}27^\circ}$ В; $\tilde{S}_1 = 1108{,}8\,e^{j65{,}28^\circ}$ В·А; $P_1 = 463{,}7$ Вт; $Q_1 = 1006{,}9$ ВАр; $S_2 = 882{,}6\,e^{j37{,}86^\circ}$ В·А; $P_2 = 696{,}8$ Вт; $Q_2 = 541{,}7$ ВАт; $P = 1160{,}5$ Вт; $Q = 1548{,}6$ ВАр; $\cos\varphi = 0{,}6$.

19. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В уключаны паралельна два прымальнікі, комплексныя супраціўленні якіх $Z_1 = 20 + j10$ Ом, $Z_2 = = 40 - j20$ Ом. Вызначце комплексныя токі і модулі токаў у прымальніках і ў неразгалінаванай частцы ланцуга, комплексную магутнасць, актыўную і рэактыўную магутнасці кожнага прымальніка і ўсяго ланцуга.

А д к а з: $\dot{I}_1 = 8{,}8 - j\,4{,}4$ А; $I_1 = 9{,}839$ А; $\dot{I}_2 = 4{,}4 + j\,2{,}2$ А; $I_2 = 4{,}919$ А; $\dot{I} = 13{,}2 - j\,2{,}2$ А; $I = 13{,}38$ А; $\tilde{S}_1 = 1936 + j\,968$ В·А; $P_1 = 1936$ Вт; $Q_1 = 968$ ВАр; $\tilde{S}_2 = 968 - j\,484$ В·А; $P_2 = 968$ Вт; $Q_2 = 484$ ВАр; $\tilde{S} = 2904 + j\,484$ В·А; $P = 2904$ Вт; $Q = 484$ ВАр.

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Вывучэнне неразгалінаванага электрычнага ланцуга. Рэзананс напружання

М э т а р а б о т ы: эксперыментальна даследаваць ланцуг пераменнага току з паслядоўным злучэннем рэзістара, катушкі індуктыўнасці і кандэнсатара, вывучыць прычыны і вынік рэзанансу напружання, набыць уменні і навыкі ў зніманні рэзанансных крывых і пабудове вектарных дыяграм.

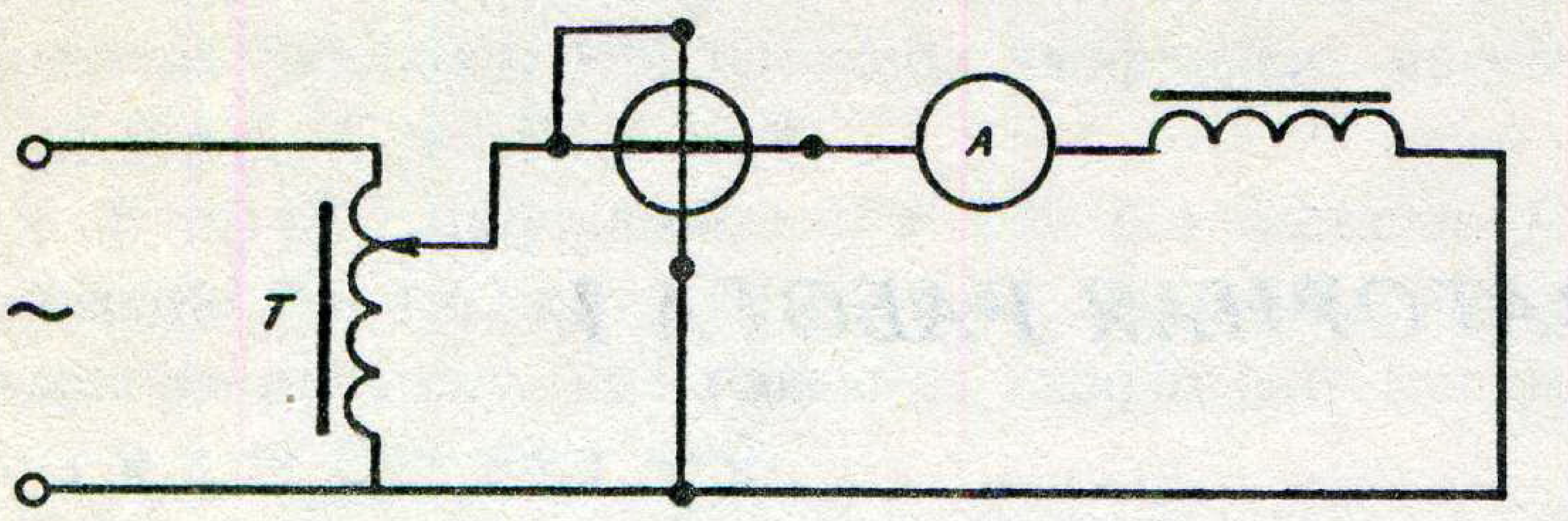
У працэсе выканання лабараторнай работы студэнты павінны набыць уменні і навыкі ўключэння ў ланцуг амперметра, вальтметра і ватметра, вымярэння электрычных велічынь (току, напружання, магутнасці), карыстацца мікракалькулятарам МК-61, ЭВМ «Іскра» або іншымі ЭВМ для падліку вынікаў лабараторнай работы і самакантролю.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 1.5, 1.6, 1.7, 1.9 падручніка. Усякі электрычны ланцуг валодае актыўным супраціўленнем, ёмістасцю і індуктыўнасцю. Для вывучэння ланцуга пераменнага току будзем лічыць, што адны прымальнікі валодаюць толькі актыўным супраціўленнем, другія — толькі ёмістасным або індуктыўным. Актыўнае супраціўленне маюць рэзістары. Катушкі індуктыўнасці маюць як індуктыўнае ωL, так і актыўнае r супраціўленні, кандэнсатары — ёмістаснае супраціўленне $1/\omega C$) (актыўнае супраціўленне малое і ў разлік не прымаецца).

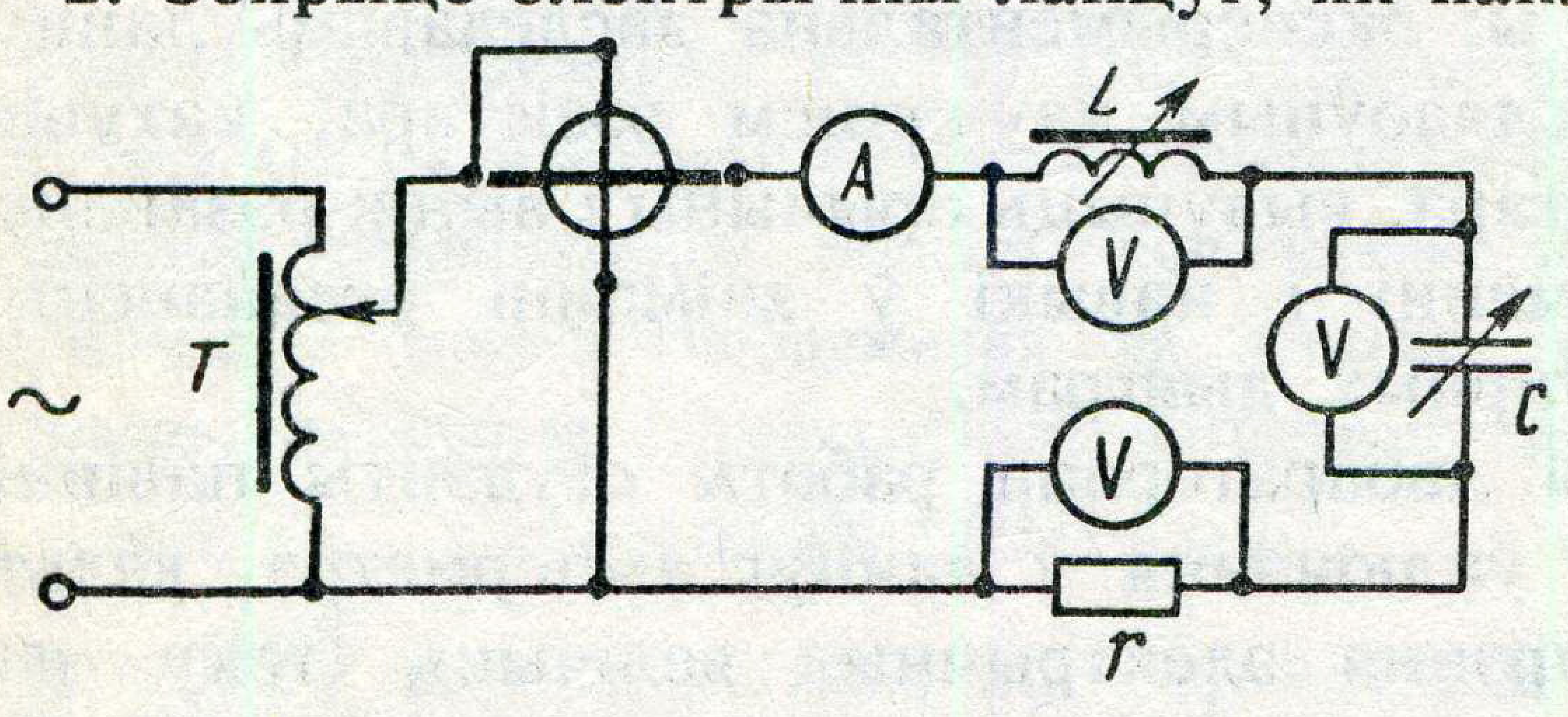
Вывучэнне неразгалінаванага электрычнага ланцуга

1. Збярыце электрычны ланцуг, як паказана на схеме рыс. 1.24. У якасці індуктыўнага супраціўлення вазьміце катушку школьнага трансфарматара на 220 В са стрыжнем. Мантаж электрычнага ланцуга пажадана выканаць на стэндзе. Па паказанні ватметра і амперметра вызначце актыўнае супраціўленне катушкі з незамкнутым магнітапровадам $r = P/I^2$.



Рыс. 1.24. Схема ланцуга для вызначэння актыўнага супраціўлення дроселя

2. Збярыце электрычны ланцуг, як паказана на схеме рыс. 1.25. У якасці ёмістаснага супраціўлення вазьміце батарэю кандэнсатараў на 30—40 мкФ, а актыўнага супраціўлення — паўзунковы рэастат 100 Ом. Падбярыце адпаведныя электравымяральныя прыборы.



Рыс. 1.25. Схема неразгалінаванага электрычнага ланцуга

3. Уключыце сабраны ланцуг у сетку і ўстанавіце з дапамогаю ЛАТра напружанне 100—150 В. Змяняйце індуктыўнасць катушкі, ёмістасць батарэі кандэнсатараў і супраціўленне рэастата, устанавіце такі рэжым у ланцугу, каб стрэлкі прыбораў адхіліліся не менш чым на 1/3 шкалы прыбора. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1.

Табліца 1

Вымярэнні						Вылічэнні										
U_1, В	P, Вт	I, А	$U_р$, В	$U_к$, В	U_C, В	$r_к$, Ом	$r_р$, Ом	x_C, Ом	$x_{Lк}$, Ом	$z_к$, Ом	$z_л$, Ом	I, А	$U_{Lк}$, В	L, мГн	C, мкФ	$\cos\varphi$

4. Пры паслядоўным злучэнні прымальнікаў комплекснае поўнае супраціўленне ланцуга роўнае суме комплексных супраціўленняў асобных прымальнікаў:

$$Z = Z_р + Z_к + Z_c.$$

Ва ўмовах нашага эксперыменту маем: $Z_р = r_р$ (супраціўленне рэастата), $Z_c = -jx_c$ (супраціўленне кандэнсатараў), $Z_к = r_к + jx_{Lк}$ (комплекснае супраціўленне катушкі са стрыжнем).

Такім чынам,

$$Z = r_р + r_к + j(x_{Lк} - x_c). \qquad (1.10)$$

Вызначце актыўнае і рэактыўнае супраціўленні па паказаннях прыбораў: $r_р = U_р/I$; $jx_c = U_c/I$; $r_к = P/I^2$; $|jx_{Lк}| = \sqrt{z_к^2 - r_к^2}$, дзе $z = U_к/I$.

Падстаўце атрыманыя значэнні актыўных і рэактыўных супраціўленняў у раўнанне (1.10) і вызначце комплекснае супраціўленне і модуль супраціўлення ланцуга ($z_л$).

5. Вызначце комплексны ток і модуль току ў ланцугу і параўнайце з паказаннем амперметра.

6. Па атрыманых дадзеных $x_{Lк}$ і x_c вызначце індуктыўнасць катушкі L і ёмістасць C кандэнсатараў ($x_{Lк} = \omega L$; $x_c = 1/\omega C$).

7. Вызначце $\cos\varphi$ ланцуга:

$$\cos\varphi = \frac{r_р + r_к}{\sqrt{(r_р + r_к)^2 + (x_{Lр} - x_c)^2}}.$$

Усе вылічэнні запішыце ў табл. 1.

8. Пры паслядоўным злучэнні прымальнікаў ток у ланцугу аднолькавы на ўсіх участках ланцуга, а комплекснае напружанне ў ланцугу роўнае суме комплексных напружанняў на асобных прымальніках:

$$\dot{U} = \dot{U}_р + \dot{U}_к + \dot{U}_c.$$

9. Начарціце вектарную дыяграму току і напружанняў, трохвугольнік напружанняў. Па даных значэннях старон трохвугольніка вылічыце каэфіцыент магутнасці ($\cos\varphi$).

Рэзананс напружання

1. Выключце з ланцуга рэастат і зніміце рэзанансныя крывыя. Змяняйце індуктыўнасць катушкі пры пастаяннай частаце току і ёмістасці батарэі кандэнсатараў. Частата току ў ланцугу — 50 Гц, а ёмістасць батарэі кандэнсатараў пажадана ўзяць 30—40 мкФ. Змяненне індуктыўнасці катушкі ажыццяўляецца падоўжным перамяшчэннем стрыжня трансфарматара.

1. Устанавіце ёмістасць батарэі кандэнсатараў 20—30 мкФ, замкніце магнітапровад трансфарматара. З ЛАТра падайце ў ланцуг напружанне 40—50 В і паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2.

Табліца 2

Вымярэнні						Вылічэнні					
U, В	$U_к$, В	U_C, В	I, А	P, Вт	C, мкФ	$r_к$, Ом	$z_к$, мГн	$x_{Lк}$, Ом	$L_к$, мГн	$U_{Lк}$, В	$\cos\varphi$

Выканайце 7—8 вымярэнняў і вылічэнняў велічынь пры розных значэннях індуктыўнасці катушкі. Звярніце ўвагу, што пры рэзанансе ток у ланцугу будзе мець максімальнае значэнне.

2. Па даных вымярэнняў і адпаведных вылічэнняў велічынь начарціце графікі залежнасці $I = f(L)$; $U_{Lк} = f(L)$; $U_c = f(L)$ і $\cos\varphi = f(L)$, а таксама тры вектарныя дыяграмы току і напружанняў (I, U_a, U_L, U_c, U): адну дыяграму да рэзанансу, другую пры рэзанансе і трэцюю пасля рэзанансу.

II. Зніміце характарыстыкі і пабудуйце графікі залежнасці $I = f(C)$, $U_{Lк} = f(C)$; $U_c = f(C)$ і $\cos\varphi = f(C)$, змяняйце ёмістасць батарэі кандэнсатараў пры пастаяннай частаце току (f = 50 Гц) і індуктыўнасці катушкі (L = const). Вымярэнні пачынайце пры C = 5 мкФ і паступова павялічвайце ёмістасць батарэі кандэнсатараў.

1. Выканайце 7—8 вымярэнняў і вылічэнняў велічынь пры розных значэннях ёмістасці. Пры рэзанансе ток будзе мець максімальнае значэнне. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 3.

Табліца 3

Вымярэнні							Вылічэнні	
C, мкФ	U_1, В	U_k, В	U_c, В	I, А	P, Вт	L_0, Гн	$U_{Lк}$, В	$\cos\varphi$

2. Па даных вымярэнняў і вылічэнняў велічынь начарціце графікі залежнасці $I = f(C)$, $U_c = f(C)$, $U_{L\text{к}} = f(C)$ і $\cos\varphi = f(C)$, а таксама тры вектарныя дыяграмы току і напружанняў (I, $U_{L\text{к}}$, $U_\text{к}$, U_C, U): адну дыяграму да рэзанансу, другую пры рэзанансе і трэцюю пасля рэзанансу.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Чаму ў ланцугу з паслядоўным злучэннем r, L і C напружанне на клемах ланцуга не роўнае арыфметычнай суме напружанняў на асобных элементах ланцуга?

2. Як начарціць вектарную дыяграму напружанняў для ланцуга з паслядоўным злучэннем r, L і C?

3. Па паказаннях якіх прыбораў можна вызначыць $\cos\varphi$ у ланцугу?

4. Па якіх даных электрычнага ланцуга можна вылічыць $\cos\varphi$ у ланцугу?

5. У якіх ланцугах і пры якім рэжыме ў ланцугу назіраецца рэзананс напружання?

6. Якія прыметы наяўнасці рэзанансу напружання ў ланцугу?

7. Як атрымаць рэзананс напружання пры пастаяннай частаце току ў ланцугу?

8. Якія рэзанансныя крывыя вызначаюцца ў дадзенай рабоце?

9. Якія вектарныя дыяграмы патрэбна начарціць ў дадзенай рабоце і чым яны адрозніваюцца?

10. Чаму роўны каэфіцыент магутнасці ($\cos\varphi$) пры рэзанансе?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Вывучэнне разгалінаванага электрычнага ланцуга. Рэзананс току

М э т а р а б о т ы: эксперыментальна даследаваць ланцуг пераменнага току з паралельным злучэннем рэзістара, катушкі індуктыўнасці і кандэнсатара; вывучыць прычыны і вынік рэзанансу току, набыць уменні і навыкі ў зніманні рэзанансных крывых і пабудове вектарных дыяграм. У працэсе выканання лабараторнай работы студэнты павінны набыць уменні і навыкі ў вымярэнні электрычных велічынь, пабудове вектарных дыяграм токаў і напружання, трохвугольніка праводнасцей.

Тэарэтычныя звесткі

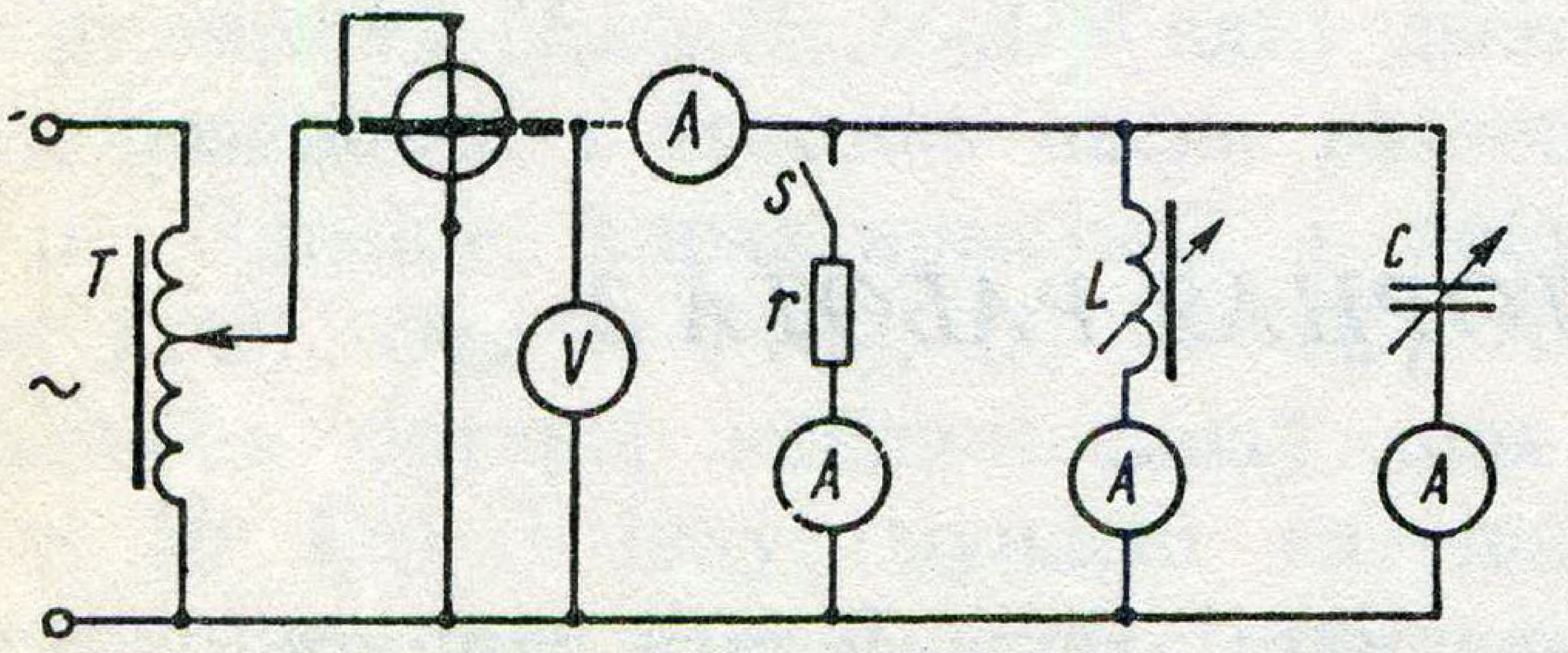
Вывучыце § 1.8 і 1.9 падручніка. Пры паралельным злучэнні прымальнікаў комплексны ток у неразгалінаванай частцы ланцуга роўны суме комплексных токаў галін: $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \ldots + \dot{I}_n$.

Комплексны ток у кожнай галіне вызначаецца паводле формулы $\dot{I} = \dot{U}/Z = \dot{U}Y$. Такім чынам, $\dot{I} = \dot{U}Y = \dot{U}(Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_n)$, дзе $Y = Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_n$, а $Y_n = g_n - j(b_{Ln} - b_{cn}) = g_n - jb_n$. Значыць, $Y = \sum\limits_n g_n - \sum\limits_n jb_n$, а $\dot{I} = \dot{U}(\sum\limits_n g_n - \sum\limits_n jb_n)$.

Выкананне работы

Вывучэнне разгалінаванага электрычнага ланцуга

Збярыце электрычны ланцуг, як паказана на схеме рыс. 1.26. У якасці індуктыўнай нагрузкі вазьміце катушку школьнага трансфарматара на 220 В з магнітапровадам, у якасці ёмістаснага супраціўлення — батарэю кандэнсатараў на 30—40 мкФ, а актыўнага супраціўлення — паўзунковы рэастат на 300—500 Ом. Падбярыце адпаведныя электравымяральныя прыборы. Мантаж электрычнага ланцуга пажадана выканаць на стэндзе.



Рыс. 1.26. Схема разгалінаванага электрычнага ланцуга

1. Вызначце актыўныя і рэактыўныя састаўляльныя комплекснай праводнасці паралельных галін. Для рэастата

$$Y_р = g_р - jb_р = g_р,$$

дзе $g_р = 1/r_р = I/U$, $jb_р = 0$ — рэастатактыўнае супраціўленне.

Для катушкі індуктыўнасці

$$Y_к = g_к - jb_к,$$

дзе $g_к = r_к/z_к^2$.

Для вызначэння актыўнага супраціўлення катушкі $r_к$ трэба разамкнуць ключ S — выключыць рэастат. Тады $r_к = P/I_к^2$, а $z_к = U_к/I_к$. Значыць, $g_к = P/U^2$, а $b_к = \sqrt{y_к^2 - g_к^2}$, дзе $y_к = I_к/U$.

Для кандэнсатара $Y_c = g_c - j(b_L - b_c) = jb_c$ (кандэнсатар-ёмістасная нагрузка, $b_L = 0$ і $g_c = 0$), а $b_c = I_c/U$.

Такім чынам, $Y = \sum g_n - \sum jb_n = (g_р + g_к) - j(b_L - b_c)$, а $\dot{I} = \dot{U}Y = \dot{U}\,[(g_р + g_к) - j(b_L - b_c)]$.

Калі накіруем вектар напружання на восі рэчаісных лікаў, то будзем мець: $\dot{U} = Ue^{j0°} = U$.

2. Вызначце модуль току ў ланцугу

$$|\dot{I}| = U\,|Y| = U\sqrt{(g_р + g_к)^2 + (b_L - b_c)^2}$$

і параўнайце з паказаннем амперметра ў неразгалінаванай частцы ланцуга.

Паказанні прыбораў і вынікі вылічэнняў запішыце ў табл. 1.

Табліца 1

Вымярэнні						Вылічэнні						
U, В	I, А	P, Вт	$I_р$, А	$I_к$, А	I_c, А	$g_р$, См	$g_к$, См	b_c, См	$b_к$, См	$\|Y\|$, См	I, А	$\cos\varphi$

3. Вызначце актыўныя і рэактыўныя токі галін і начарціце вектарную дыяграму напружання і токаў разгалінаванага ланцуга. Начарціце трохвугольнік токаў разгалінаванага ланцуга і вызначце $\cos\varphi$ ланцуга.

Рэзананс току

У сабраным электрычным ланцугу адключыце рэастат і зніміце стрыжань, які замыкае магнітапровад трансфарматара. Устанавіце ёмістасць батарэі кандэнсатараў 10—15 мкФ, падключыце сабраны ланцуг да ЛАТра і падайце ў ланцуг напружанне 150—200 В. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2.

Табліца 2

Вымярэнні						Вылічэнні				
C, мкФ	U, В	P, Вт	I, А	I_c, А	$I_к$, А	$g_к$, См	$I_{а.к}$, А	$b_к$, См	$I_{Lк}$, А	$\cos\varphi$

Зніміце рэзанансныя крывыя, змяняйце ёмістасць батарэі кандэнсатараў пры пастаяннай індуктыўнасці катушкі. Правядзіце 7—8 вымярэнняў і вылічэнняў пры розных значэннях ёмістасці батарэі кандэнсатараў. Звярніце ўвагу, што пры рэзанансе ток у неразгалінаванай частцы ланцуга будзе мець мінімальнае значэнне, а $\cos \varphi = 1$.

Начарціце рэзанансныя крывыя $I = f(C)$, $I_c = f(C)$, $I_{Lк} = f(C)$ і $\cos \varphi = f(C)$, а таксама тры вектарныя дыяграмы токаў і напружання: адну да рэзанансу, другую пры рэзанансе і трэцюю пасля рэзанансу.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Чаму ток у неразгалінаванай частцы ланцуга не роўны арыфметычнай суме токаў у галінах з актыўнай, індуктыўнай і ёмістаснай нагрузкамі?
2. Як вызначыць актыўную і рэактыўную састаўляльныя току разгалінаванага ўчастка ланцуга?
3. Як вызначыць актыўную і рэактыўную састаўляльныя току кожнай галіны?
4. Чаму роўны ток у неразгалінаваным участку ланцуга?
5. Як начарціць вектарную дыяграму токаў і напружання разгалінаванага ўчастка ланцуга?
6. У якіх ланцугах і пры якім рэжыме ланцуга ўзнікае рэзананс току?
7. Якія прыметы наяўнасці рэзанансу ў ланцугу?
8. Чаму амперметр у неразгалінаваным участку ланцуга пры рэзанансе паказвае мінімальную сілу току?
9. Як уплывае на $\cos \varphi$ паралельнае падключэнне ёмістасці (кандэнсатара) да індуктыўнага прымальніка?
10. Чаму роўны каэфіцыент магутнасці ($\cos \varphi$) пры рэзанансе току?
11. Якія вектарныя дыяграмы патрэбна начарціць у дадзенай рабоце і чым яны адрозніваюцца паміж сабою?

2

ТРОХФАЗНЫЯ ЭЛЕКТРЫЧНЫЯ ЛАНЦУГІ

2.1. Атрыманне трохфазнай сістэмы

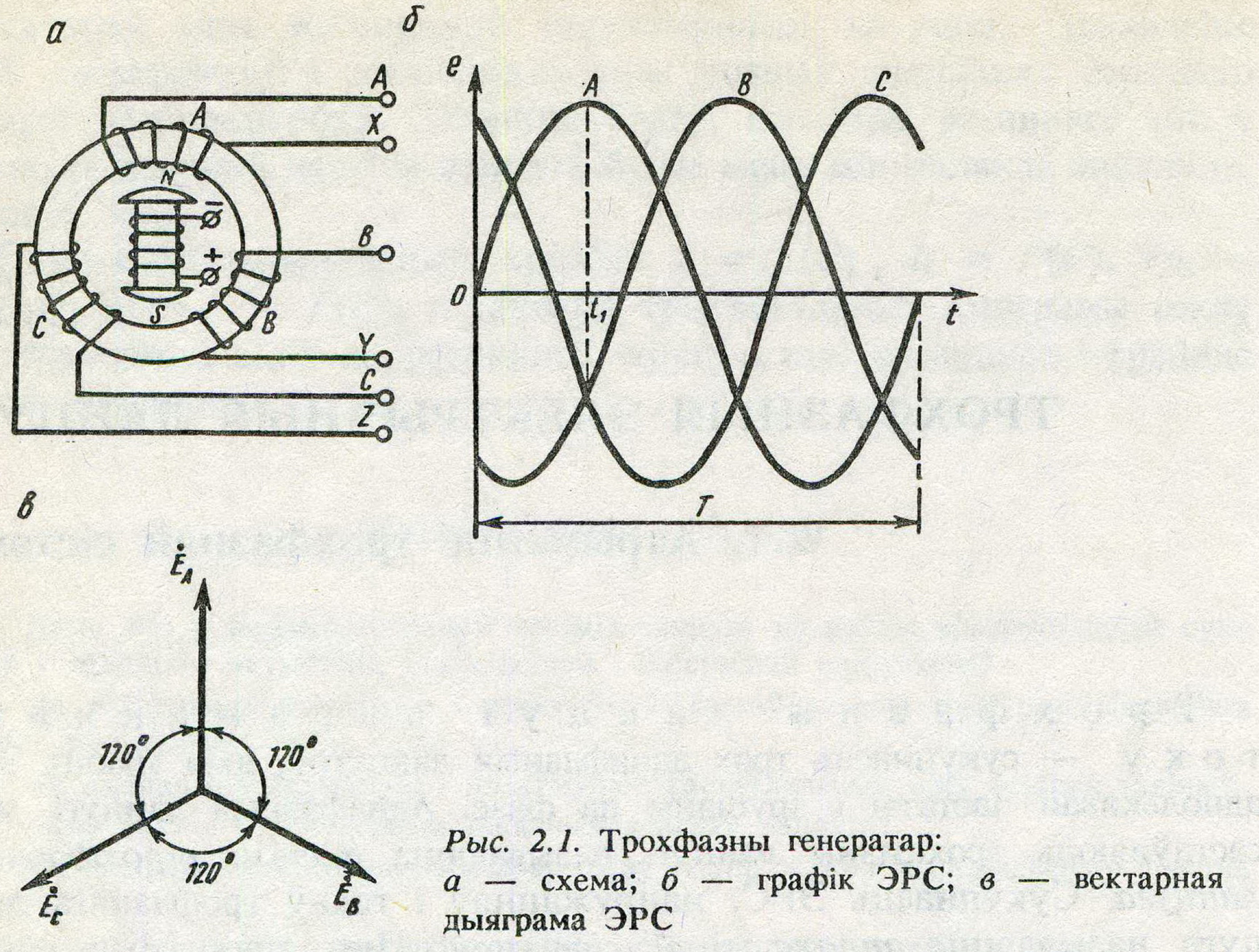
Трохфазны ланцуг пераменнага току — сукупнасць трох аднафазных ланцугоў, якія маюць ЭРС аднолькавай частаты і зрушаны па фазе. Аднафазныя ланцугі, якія састаўляюць трохфазны ланцуг, называюцца *фазамі трохфазнага ланцуга.* Сукупнасць ЭРС, напружанняў і токаў трофазнага ланцуга называецца *трохфазнай сістэмай.* Пры зруху фаз паміж ЭРС, напружаннямі і токамі на 120° і роўнасці іх амплітудных значэнняў трохфазная сістэма называецца *сіметрычнай.* Крыніцамі току трохфазной сістэмы з'яўляюцца розныя генератары. Прасцейшы трохфазны генератар мае у статары тры аднолькавыя зрушаныя адна адносна другой ў прасторы на 120° абмоткі, якія называюцца *фазнымі абмоткамі генератара.* Адны вывады фазных абмотак — пачатак фаз генератара, абазначаюцца літарамі *A*, *B*, *C*, другія — канцы фаз генератара, абазначаюцца літарамі *X*, *Y*, *Z* (рыс. 21, *а*). Аналагічна і фазы трохфазнага генератара называюцца фазамі *A*, *B*, *C*.

Ротар трохфазнага генератара ўяўляе сабою электрамагніт. Пры вярчэнні ротара з вуглавой частатой ω у фазных абмотках статара будуць узбуджацца ЭРС індукцыі e_A, e_B, e_C са зрухам фаз на 120°.

$$e_A = E_m \sin \omega t; \; e_B = E_m \sin (\omega t - 120°);$$

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240°).$$

Імгненныя значэнні ЭРС трохфазнага генератара графічна выразяцца ў выглядзе трох сінусоід, зрушаных адна адносна другой па фазе на 120° (рыс. 2.1, *б*). Алгебраічная сума імгненных



Рыс. 2.1. Трохфазны генератар:
а — схема; *б* — графік ЭРС; *в* — вектарная дыяграма ЭРС

значэнняў ЭРС трохфазнага генератара ў любы момант часу роўная нулю. Напрыклад, для моманту часу $t = T/4$ атрымаем:

$$e_A = E_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}\,\frac{T}{4}\right) = E_m \sin 0{,}5\,\pi = E_m\,;$$

$$e_B = E_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}\,\frac{T}{4} - 120°\right) = -\,E_m \sin 30° = -0{,}5\,E_m\,;$$

$$e_C = E_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}\,\frac{T}{4} - 240°\right) = -\,E_m \sin 150° = -0{,}5\,E_m\,.$$

Такім чынам, $e_A + e_B + e_C = E_m - 0{,}5\,E_m - 0{,}5\,E_m = 0.$

На графіку гэтыя імгненныя значэнні ЭРС адпавядаюць моманту часу t_1. Аналагічна можна паказаць, што сума імгненных значэнняў ЭРС у любы момант часу таксама будзе роўная нулю. Сума комплексных амплітуд ЭРС трохфазнай сіметрычнай сістэмы ў любы момант часу роўная нулю. Запішам у комплексным выглядзе ЭРС кожнай фазы (пры ψ_0):

$$\dot{E}_{mA} = E_m\,e^{j\omega t}\,;\;\; \dot{E}_{mB} = E_m e^{\,j\,(\omega t - 120°)}\,;$$

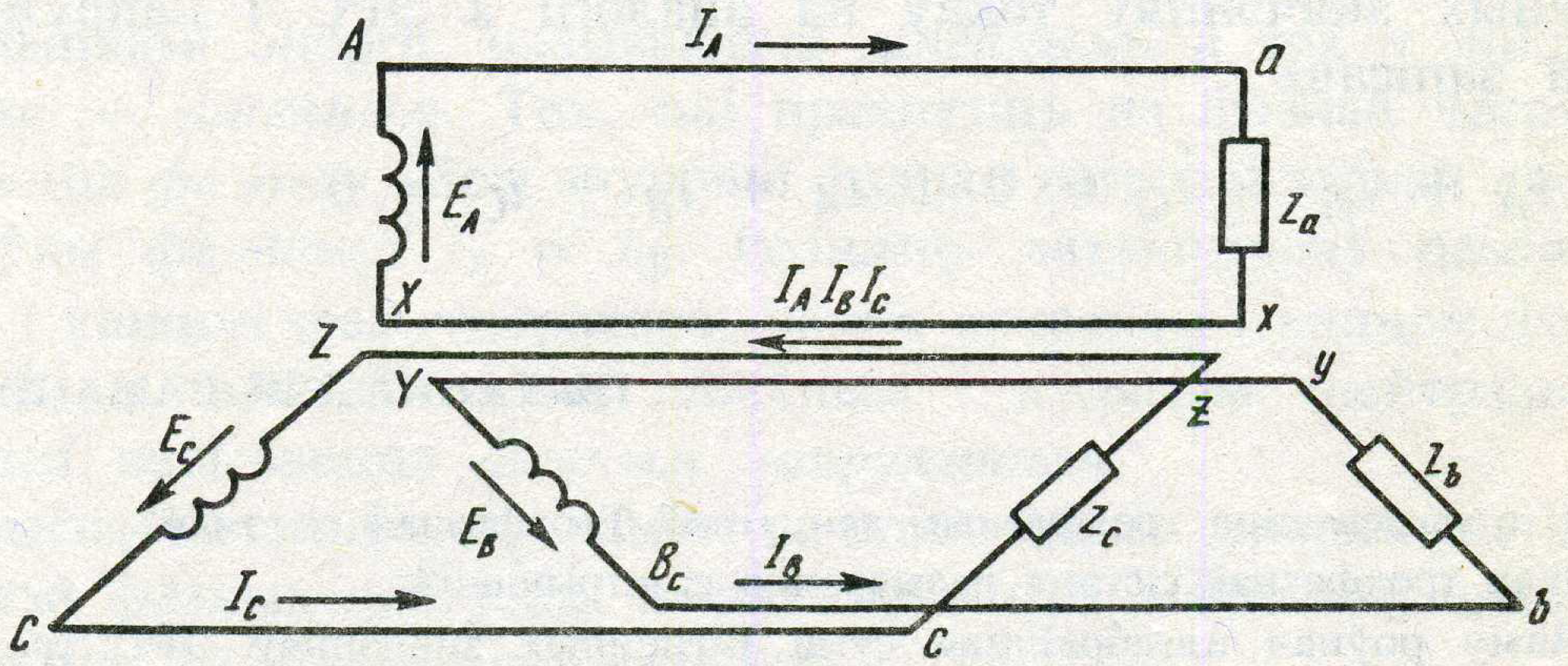
$$\dot{E}_{mC} = E_m e^{j(\omega t - 240^\circ)}.$$

Пры складанні атрымаем

$$\dot{E}_{mA} + \dot{E}_{mB} + \dot{E}_{mC} = E_m e^{j\omega t} (e^{j0} + e^{-j120^\circ} + e^{-j240^\circ}) = 0.$$

На вектарнай дыяграме ЭРС трохфазнага генератара паказаны ў выглядзе трохпрамянёвай сіметрычнай зоркі (рыс. 2.1, *в*). Геаметрычная сума дзейных значэнняў ЭРС трохфазнага генератара таксама роўная нулю, бо сума вектараў E_C і $\dot{E}_B$ дае вектар, роўны вектару $\dot{E}_A$ і зрушаны па фазе адносна яго на 180°: $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.

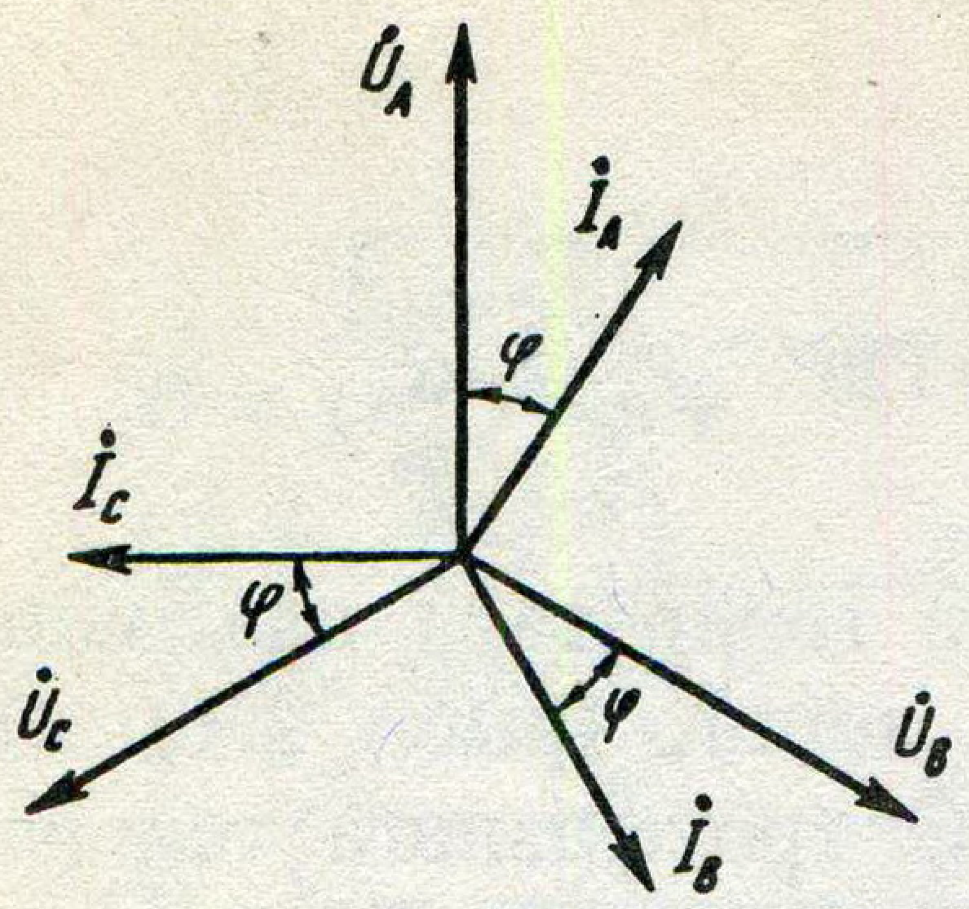
За дадатны напрамак ЭРС прымаецца напрамак ад канцоў фаз генератара (*X*, *Y*, *Z*) да іх пачаткаў (*A*, *B*, *C*) (рыс. 2.2). Аналагічна ўказваецца дадатны напрамак току і напружання. У фазных нагрузках, наадварот, дадатным напрамкам току і напружання лічыцца напрамак ад пачаткаў фазных нагрузак да іх канцоў.



Рыс. 2.2. Схема падключэння нагрузкі да трохфазнага генератара

Да кожнай фазы генератара падключаецца нагрузка (рыс. 2.2). Нагрузка фаз называецца *сіметрычнай*, калі да кожнай падключаны супраціўленні, роўныя па значэнні і аднолькавыя па характары (маюць аднолькавыя ёмістасць, індуктыўнасць і актыўнае супраціўленне).

Пры сіметрычнай нагрузцы фаз генератара вектарная дыяграма падзення напружання на фазных нагрузках (фазных напружанняў) таксама вызначаецца трохпрамянёвай сіметрычнай зоркай (рыс.2.3). Геаметрычная сума фазных напружанняў пры сіметрычнай нагрузцы фаз роўная нулю: $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$. Пры сіметрычнай нагрузцы фаз генератара імгненныя значэнні фазных напружанняў



Рыс. 2.3. Вектарная дыяграма току і напружання трохфазнай сіметрычнай сістэмы

змяняюцца паводле сінусоіднага закону і на графіку вызначаюцца трыма сінусоідамі са зрухам фаз на 120°. У любы момант часу іх алгебраічная сума роўная нулю.

У залежнасці ад характару фазных нагрузак вектары токаў будуць адставаць, супадаць або апярэджваць вектары фазных напружанняў. Пры сіметрычнай нагрузцы, якая мае актыўнае і індуктыўнае супраціўленні, вектарная дыяграма токаў будзе мець выгляд трохпрамянёвай сіметрычнай зоркі, зрушанай адносна фазных напружанняў па руху гадзіннікавай стрэлкі на вугал φ (гл. рыс. 2.3.). Пры нагрузцы, якая мае актыўнае і ёмістаснае супраціўленні, вектарная дыяграма токаў будзе зрушана супраць руху гадзіннікавай стрэлкі адносна вектарнай дыяграмы напружанняў на вугал φ.

Пры сіметрычнай нагрузцы фаз генератара для дзейных і імгненных значэнняў токаў па аналогіі з ЭРС і напружаннямі можна запісаць

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \text{ і } i_A + i_B + i_C = 0 .$$

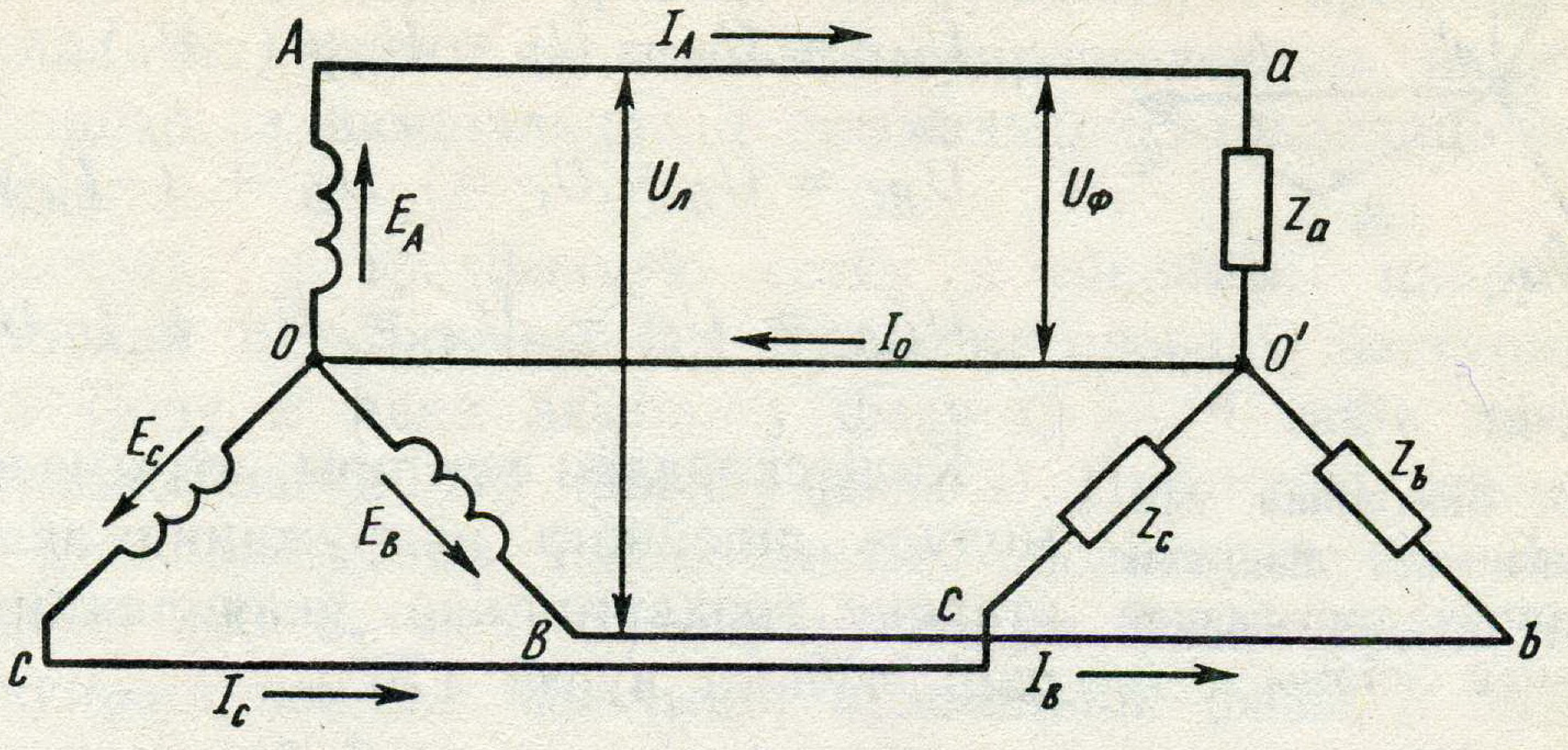
ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца трохфазным ланцугом? Трохфазнай сістэмай?
2. Якая трохфазная сістэма называецца сіметрычнай?
3. Чаму роўная алгебраічная сума імгненных значэнняў ЭРС трохфазнай сіметрычнай сістэмы? Сума комплексных амплітуд ЭРС трохфазнай сіметрычнай сістэмы?
4. Якая фазная нагрузка называецца сіметрычнай?
5. Начарціце вектарныя дыяграмы токаў і напружанняў трохфазнай сіметрычнай сістэмы пры актыўнай, актыўна-індуктыўнай і актыўна-ёмістаснай нагрузках?
6. Чаму роўная сума токаў трохфазнай сіметрычнай сістэмы?

2.2. Злучэнне трохфазнай сістэмы зоркай

Кожная фаза генератара мае крыніцу электрычнай энергіі і можа быць самастойна падключана да нагрузкі (гл. рыс. 2.2). Шасціправадную трохфазную сістэму можна замяніць чатырохправадной, калі канцы фаз генератара і канцы фазных нагрузак злучыць у асобныя вузлы (O, O'), якія злучаюцца паміж сабою

чацвёртым провадам. Вузлы (O, O') называецца *нулявымі* або *нейтральнымі вузламі,* а провад, які злучае паміж сабою гэтыя вузлы, называецца *нейтральным (нулявым) провадам* (рыс. 2.4).



Рыс. 2.4. Схема злучэння абмотак генератара і фазных нагрузак зоркай

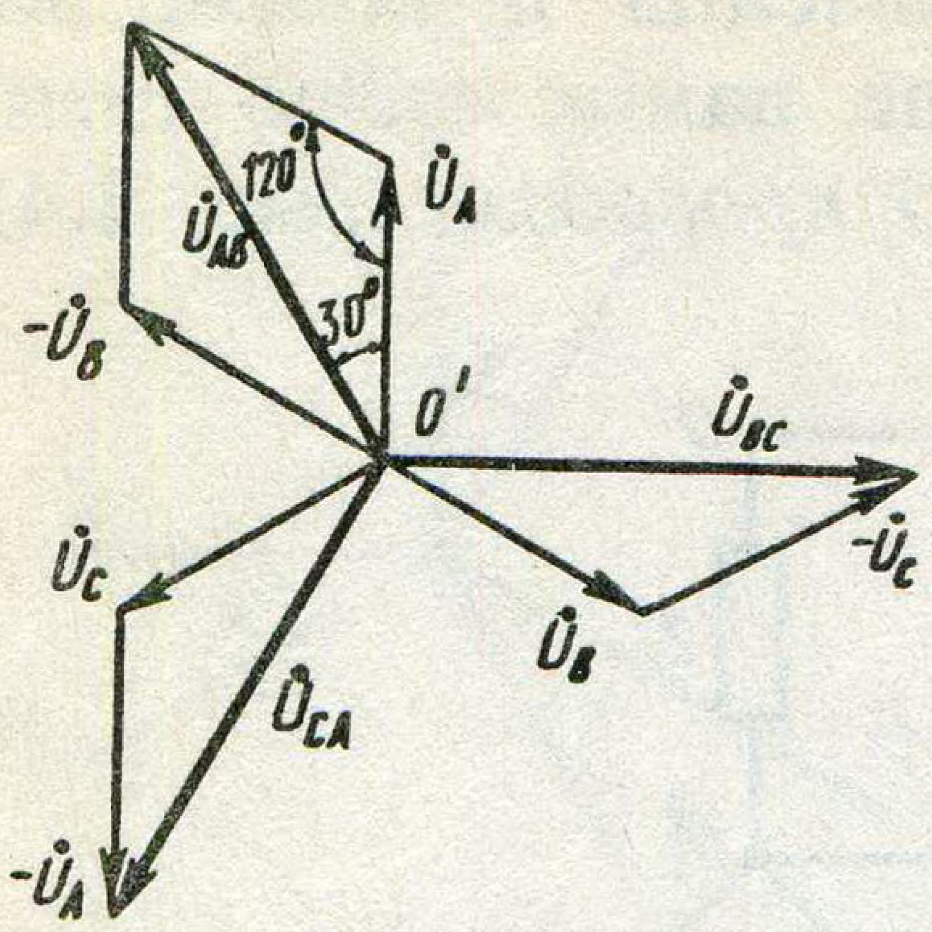
Злучэнне, пры якім канцы фазных нагрузак або канцы фаз генератара злучаюцца ў адзін вузел, называецца *зоркай* і абазначаецца Y. Правады, якія злучаюць пачаткі фаз генератара з прымальнікамі энергіі, называюцца *лінейнымі,* а ток у лінейным провадзе — *лінейным.* Ток, які праходзіць па фазнай нагрузцы, называецца *фазным.* Пры злучэнні фазнай нагрузкі зоркай лінейны ток роўны фазнаму: $I_л = I_ф$. Рознасць патэнцыялаў паміж пачаткам і канцом фаз генератара, паміж пачаткам і канцом фазных нагрузак, а таксама паміж лінейным і нулявым (нейтральным) правадамі называецца *фазным напружаннем.*

Рознасць патэнцыялаў паміж пачаткамі фаз генератара, паміж пачаткамі фазных наргузак, а таксама паміж лінейнымі правадамі называецца *лінейным напружаннем.*

Пры злучэнні с і м е т р ы ч н а й н а г р у з к і зоркай лінейнае напружанне большае за фазнае ў $\sqrt{3}$ разоў: $U_л = \sqrt{3}\, U_ф$. З вызначэння фазнага напружання як рознасці патэнціялаў паміж пачаткам і канцом фаз генератара вынікае, што калі патэнцыял канцоў фаз генератара лічыць роўным нулю, то патэнцыялы пачаткаў фаз генератара A, B, C будуць роўныя модулям фазных напружанняў U_A, U_B, U_C.

Лінейныя напружанні — гэта рознасць патэнцыялаў паміж пачаткамі фаз генератара. Такім чынам, можна запісаць для дзейных значэнняў лінейных і фазных напружанняў сіметрычнай сістэмы:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B;\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C;\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A\,.$$



Рыс. 2.5. Вектарная дыяграма фазных і лінейных напружанняў трохфазнай сіметрычнай сістэмы

З вектарнай дыяграмы фазных напружанняў сіметрычнай сістэмы (рыс. 2.5) маем:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_A + (-\dot{U}_B);$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C);$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_C + (-\dot{U}_A).$$

Калі складзём вектары, атрымаем, што модуль лінейнага напружання адпавядае старане трохвугольніка, якая ляжыць супраць тупога вугла 120°:

$$U_{AB}^2 = U_A^2 + U_B^2 - 2U_A U_B \cos 120°;$$

$$U_л^2 = 2U_ф^2 - 2U_ф^2 \cos 120°.$$

Такім чынам, $U_л = \sqrt{3}\, U_ф$.

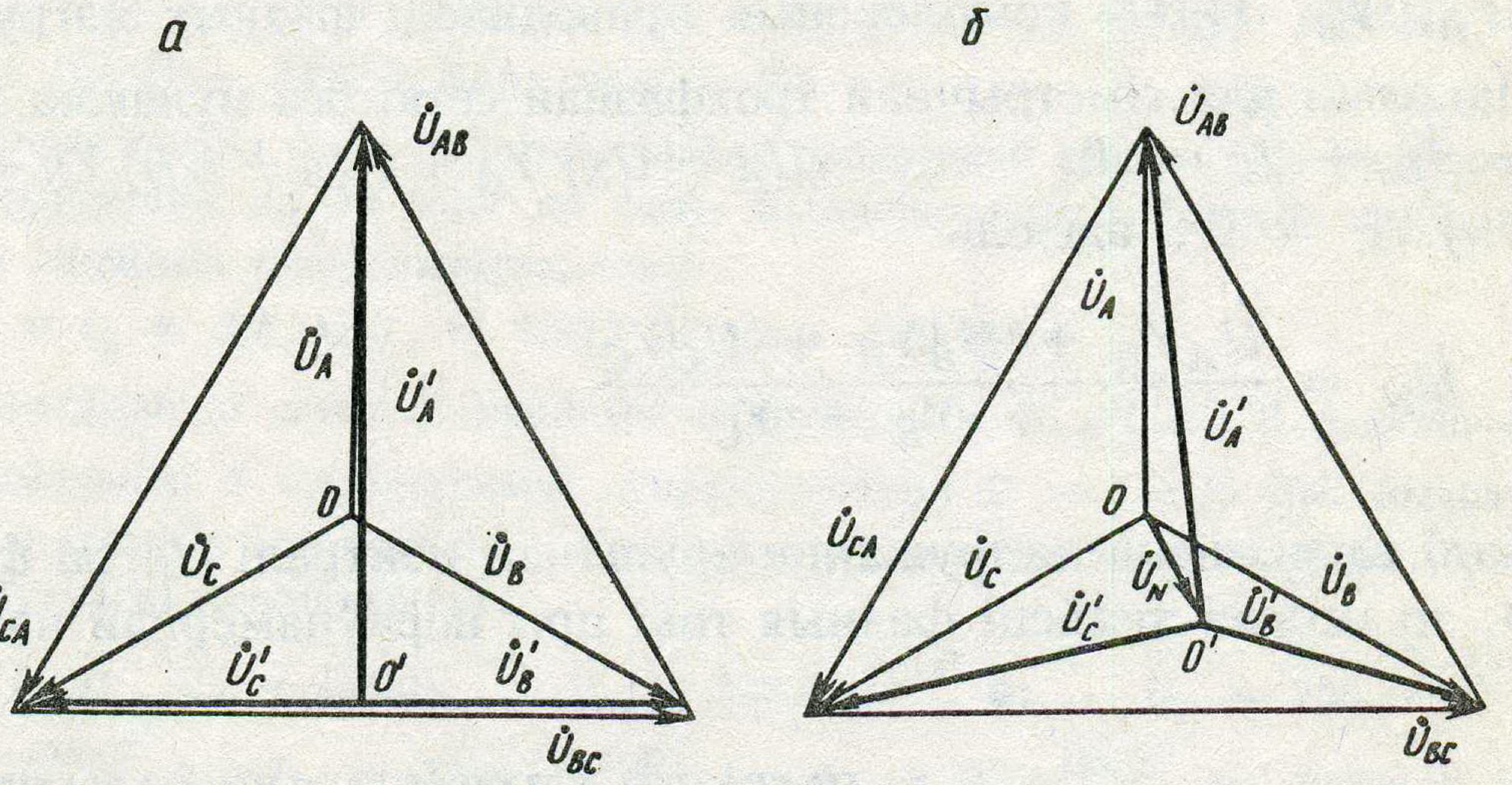
Пры сіметрычнай нагрузцы лінейныя напружанні маюць выгляд трохпрамянёвай зоркі, зрушанай адносна зоркі фазных напружанняў на 30°.

Пры злучэнні фазных нагрузак зоркай згодна з першым законам Кірхгофа маем: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_0 = 0$, $\dot{I}_0 = -(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)$. Такім чынам, ток у нулявым провадзе роўны суме фазных токаў з адваротным знакам. Пры сіметрычнай нагрузцы $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$. Значыць, пры сіметрычнай нагрузцы ток у нулявым провадзе роўны нулю ($I_0 = 0$), і чатырохправадны ланцуг замяняецца трохправадным. Сіметрычнай нагрузкай трохфазнага ланцуга з'яўляюцца электрарухавікі, электрычныя печы, трансфарматары і інш.

Н е с і м е т р ы ч н а я н а г р у з к а ўключаецца ў трохфазную сетку зоркай з нулявым провадам. Пры гэтым кожная фаза трохфазнага ланцуга не залежыць ад другіх фаз. Напружанні на фазных нагрузках усіх трох фаз аднолькавыя пры розных велічынях фазных нагрузак. Змяненне фазнай нагрузкі адной фазы прыводзіць да змянення току ў гэтай фазе і не ўплывае на ток у другіх фазах. Каб нулявы провад не змог адключыцца, на ім не ставяць засцерагальніка. Несіметрычнай нагрузкай трохфазнага ланцуга з'яўляюцца нагрузка асвятлення і прымальнікі бытавога абслугоўвання (электрапечы, электрапліты, халадзільнікі, тэлевізары і інш.). Несіметрычную нагрузку нельга

падключаць у трохфазную сетку зоркай без нулявога праваду. Калі гэта зрабіць, то адбудзецца пераразмеркаванне напружанняў на фазах. На фазах з большым супраціўленнем напружанне будзе большае за намінальнае фазнае напружанне, і прыёмнік можа перагарэць. На фазах з меншым супраціўленнем напружанне будзе меншае за намінальнае, і прымальнікі атрымаюць меншую магутнасць.

Напрыклад, у трохфазную сетку з лінейным напружаннем 380 В зоркай падключаны без нулявога праваду наступныя нагрузкі: у фазу *B* адна лямпа, у фазу *C* — 9 такіх лямпаў, а фаза *A* адключана (абрыў праваду фазы *A*). Пры гэтым прымальнікі фаз *B* і *C* акажуцца паключанымі паслядоўна да лінейнага напружання 380 В, якое размяркуецца па фазах прама прапарцыйна супраціўленням. Значыць, прымальнік фазы *B* будзе пад напружаннем 342 В, а прымальнік фазы *C* — пад напружаннем 38 В пры намінальным фазным напружанні 220 В. Пры роўных фазных супраціўленнях фазы *B*, *C* і *A* апынуцца пад наступнымі напружаннямі: $U'_B = U'_C = 190$ В ; $U'_A = \frac{\sqrt{3}}{2} 380 = 328{,}7$ В (рыс. 2.6, *а*).



Рыс. 2.6. Вектарныя дыяграмы лінейных і фазных напружанняў пры несіметрычнай нагрузцы трохфазнага ланцуга без нулявога праваду

Пры несіметрычнай нагрузцы трохфазнай сеткі без нулявога праваду патэнцыял вузлавога пункта *O'* нагрузкі не роўны патэнцыялу вузлавога пункта *O* фаз генератара, значыць, адбудзецца зрушэнне нейтралі і ўзнікне напружанне зрушэння нейтралі U_N.

Паводле закону Ома для кожнай фазы сеткі маем:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_N &= \dot{E}_A - \dot{I}_A Z_A ;\\ \dot{U}_N &= \dot{E}_B - \dot{I}_B Z_B ;\\ \dot{U}_N &= \dot{E}_C - \dot{I}_C Z_C ,\end{aligned}\right\} \qquad (2.1)$$

дзе ролю ЭРС выконваюць фазныя напружанні генератара $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ (для сіметрычнай сістэмы роўныя па значэнні і зрушаныя па фазе на 120°), а $\dot{I}_A Z_A = U'_A$; $\dot{I}_B Z_B = \dot{U}'_B$; $\dot{I}_C Z_C = \dot{U}'_C$ ёсць падзенне напружання на фазных нагрузках.

Такім чынам, фазныя напружанні на нагрузках выразяцца раўнаннямі: $\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_N$; $\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_N$; $\dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_N$. Тапаграфічная дыяграма фазных і лінейных напружанняў будзе мець выгляд, паказаны на рыс. 2.6, *б*. Для вызначэння напружання зрушанай нейтралі $\dot{U}_N$ выкарыстаем раўнанні (2.1) і запішам іх у такім выглядзе:

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_N)\, 1/Z_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_N)\, Y_A ;$$

$$\dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_N)\, 1/Z_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_N)\, Y_B ;$$

$$\dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_N)\, 1/Z_C = (\dot{U}_C - \dot{U}_N)\, Y_C ,$$

дзе Y_A, Y_B, Y_C — комплексныя праводнасці фазных нагрузак.

Паколькі для сіметрычнай трохфазнай сеткі без нулявога проваду $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, то $(\dot{U}_A - \dot{U}_N)\, Y_A + (\dot{U}_B - \dot{U}_N)\, Y_B + (\dot{U}_C - \dot{U}_N)\, Y_C = 0$, адсюль

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} . \qquad (2.2)$$

Калі вызначыць напружанне зрушанай нейтралі $\dot{U}_N$ па формуле (2.2), то можна знайсці фазныя токі пры нераўнамернай нагрузцы.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Якая залежнасць паміж лінейнымі і фазнымі напружаннямі, лінейнымі і фазнымі токамі ў трохфазнай сіметрычнай сістэме, злучанай зоркай?
2. Чаму нулявы провад таксама называюць ураўняльным?
3. Калі патрэбны нулявы провад пры падключэнні ў трохфазную сетку нагрузкі зоркай?
4. Чаму на нулявым провадзе не ставіцца засцерагальнік?
5. Чаму лінейнае напружанне генератара большае за фазнае не ў 2 разы, а ў $\sqrt{3}$, хаця лінейнае напружанне здымаецца в дзвюх фазных абмотак генератара?
6. Якімі будуць напружанні на сіметрычных фазных нагрузках, злучаных зоркай, пры абрыве адной фазы (*A*)?

А д к а з: $U'_B = U'_C = U_л/2$; $U'_A = 0$.

7. Якімі акажуцца напружанні і токі ў сіметрычных фазных нагрузках, злучаных зоркай, пры кароткім замыканні ў адной фазе (A)?

А д к а з: $U'_B = \sqrt{3}\,U_B$; $U'_C = \sqrt{3}\,U_C$; $I'_B = \sqrt{3}\,I_B$; $I'_C = \sqrt{3}\,I_C$; $I'_A = -(I'_B + I'_C)$; $U'_A = 0$.

8. Да асінхроннага трохфазнага рухавіка, уключанага ў сетку зоркай, падключаны зоркай кандэнсатары аднолькавай ёмістасці. Ці патрэбны нулявы провад для злучэння рухавіка з кандэнсатарамі?

9. Па якой формуле вызначаецца напружанне зрушанай нейтралі пры несіметрычнай нагрузцы фаз?

10. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U_л = 380$ В падключаны зоркай тры аднолькавыя прымальнікі, якія маюць актыўнае супраціўленне $r = 33$ Ом, індуктыўнае $x_L = 144$ Ом, ёмістаснае $x_C = 100$ Ом. Вызначце фазныя напружанні і токі, актыўную, індуктыўную магутнасці і модуль магутнасці кожнага прымальніка.

А д к а з: $\dot{U}_A = 220$В; $\dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ}$ В; $\dot{U}_c = 220e^{j120^\circ}$ В; $\dot{I}_A = 4e^{-j53{,}13^\circ}$ А; $\dot{I}_B = 4e^{-j173{,}13^\circ}$ А; $\dot{I}_C = 4e^{j66{,}87^\circ}$ А; $P = 528$ Вт; $Q = 704$ В·А; $S = 880$ В·А.

11. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U_л = 380$ В зоркай падключаны тры аднолькавыя прымальнікі, супраціўленні якіх $Z = 20 + j\,15$ Ом. Вызначце комплексныя значэнні і модулі фазных і лінейных токаў, комплексную, актыўную і рэактыўную магутнасці ланцуга, $\cos\varphi$.

А д к а з: $\dot{I}_A = 7{,}04 - j\,5{,}28$ А; $I_A = 8{,}8$ А; $\dot{I}_B = -8{,}08 - j\,3{,}44$ А; $I_B = 8{,}8$ А; $\dot{I}_C = 1{,}04 + j\,8{,}72$ А; $I_C = 8{,}8$ А; $S = 4633{,}6 + j\,3475{,}2$ В·А; $P = 4633{,}6$ Вт; $Q = 3475{,}2$ ВАр; $\cos\varphi = 0{,}8$.

12. Для павелічэння $\cos\varphi$ да прымальнікаў папярэдняй задачы (11) падключылі зоркай кандэнсатары па 50 мкФ на фазу. Вызначце модулі фазных токаў прымальнікаў і лінейных токаў ланцуга, $\cos\varphi$.

А д к а з: $I_ф = 8{,}8$ А; $I_л = 7{,}272$ А; $\cos\varphi = 0{,}968$.

13. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U_л = 380$ В падключаны зоркай прымальнікі з комплекснымі супраціўленнямі $Z = 8 + j6$ Ом. Вызначце комплексныя фазныя напружанні і токі, $\cos\varphi$ і комплексную, актыўную і рэактыўную магутнасці прымальнікаў.

А д к а з: $\dot{U}_A = 220$ В; $\dot{U}_B = 220\,e^{-j120^\circ}$ В; $\dot{U}_C = 220\,e^{j120^\circ}$ В; $\dot{I}_A = 22\,e^{-j36{,}87^\circ}$ А; $\dot{I}_B = 22\,e^{-j156{,}87^\circ}$ А; $\dot{I}_C = 22\,e^{j83{,}13^\circ}$ А; $\cos\varphi = 0{,}8$; $\tilde{S} = 4840\,e^{j36{,}87^\circ}$ В·А; $P = 3872$ Вт; $Q = 2904$ ВАр.

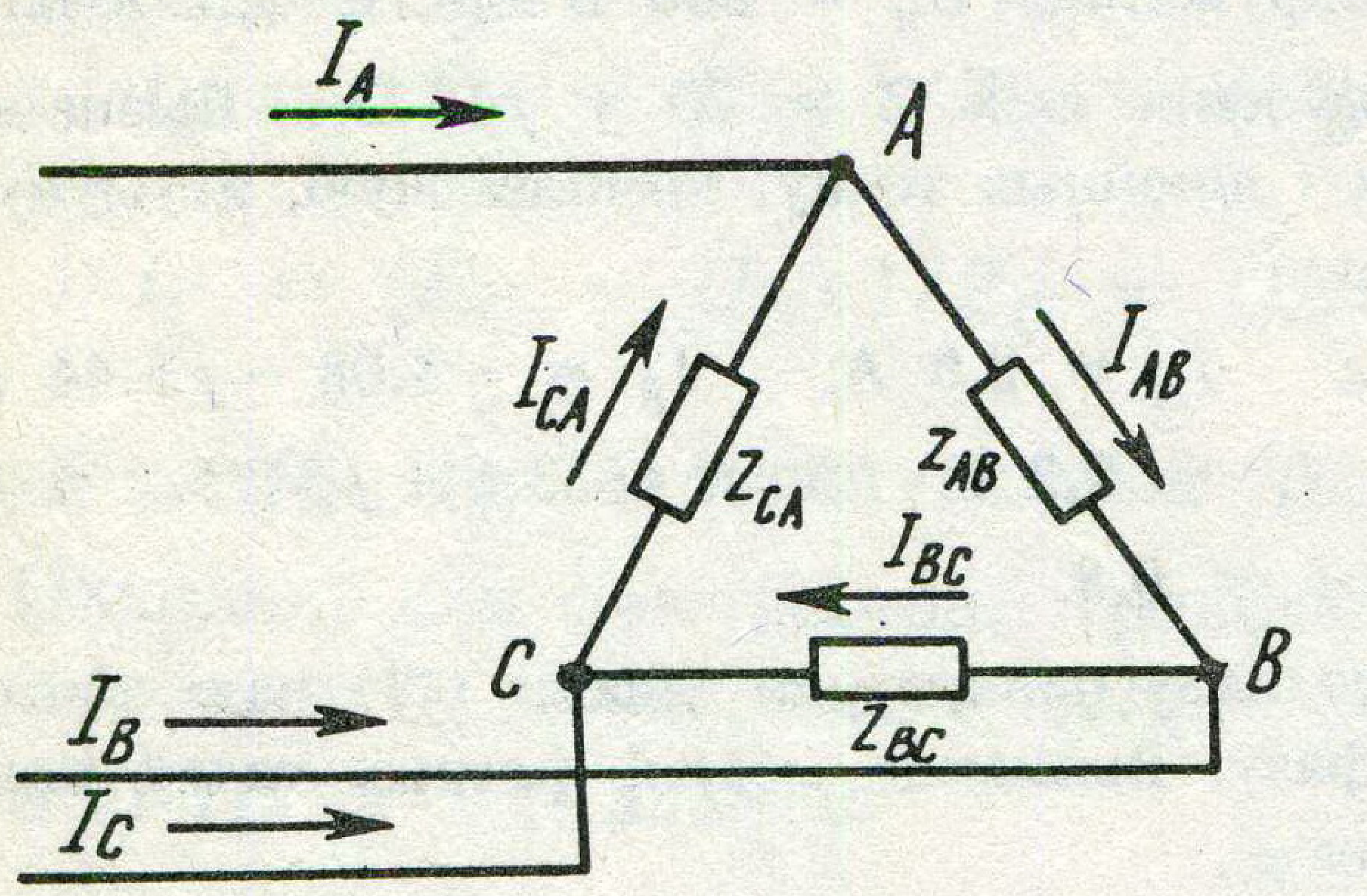
14. Тры прымальнікі, супраціўленні якіх адпаведна роўныя $Z_1 = 6 + j8$ Ом; $Z_2 = 4 + j3$ Ом; $Z_3 = 12 + j16$ Ом, уключаны ў сетку зоркай. Вызначце токі і напружанні на фазных нагрузках пры сіметрычнай фазнай ЭРС генератара $E = 220$ В без нулявога праводу.

А д к а з: $\dot{U}_A = 218{,}3 - j\,97{,}23$ В; $\dot{U}_B = -111{,}7 - j92{,}75$ В; $\dot{U}_C = -111{,}7 + j\,287{,}3$ В; $U_A = 239$ В; $U_B = 145{,}2$ В; $U_C = 308{,}3$ В; $\dot{I}_A = 5{,}32 - j\,23{,}3$ А; $\dot{I}_B = -29 - j\,1{,}44$ А; $\dot{I}_C = 8{,}14 + j\,13{,}09$ А; $I_A = 23{,}89$ А; $I_B = 29{,}04$ А; $I_C = 15{,}42$ А.

2.3. Злучэнне трохфазнай сістэмы трохвугольнікам

Злучэнне, пры якім канец першай фазы злучаецца з пачаткам другой фазы, канец другой — з пачаткам трэцяй, канец трэцяй — з пачаткам першай фазы, называецца *злучэннем трохвугольнікам* і абазначаецца знакам Δ. У нагрузках, якія не маюць электрамагнітнай сувязі, пачатак і канец вызначаюцца адвольна.

Пры злучэнні нагрузкі трохвугольнікам фазныя нагрузкі падключаюцца пад лінейнае напружанне паміж лінейнымі правадамі (рыс. 2.7). Пры падключэнні нагрузкі трохвугольнікам няма розніцы паміж лінейным і фазным напружаннямі: $U_ф = U_л$. Пры злучэнні сіметрычнай нагрузкі трохвугольнікам лінейны ток большы за фазны ў $\sqrt{3}$ разы. Для доказу гэтага запішам першы закон Кірхгофа для вузлоў (*A*, *B*, *C*) нагрузкі:



Рыс. 2.7. Схема злучэння нагрузкі трохфазнага ланцуга трохвугольнікам

$$\left.\begin{array}{ll} \dot I_A + \dot I_{CA} - \dot I_{AB} = 0 & \dot I_A = \dot I_{AB} - \dot I_{CA} = \dot I_{AB} + (-\dot I_{CA}); \\ \dot I_B - \dot I_{BC} + \dot I_{AB} = 0 \text{ або } & \dot I_B = \dot I_{BC} - \dot I_{AB} = \dot I_{BC} + (-\dot I_{AB}); \\ \dot I_C + \dot I_{BC} - \dot I_{CA} = 0 & \dot I_C = \dot I_{CA} - \dot I_{BC} = \dot I_{CA} + (-\dot I_{BC}). \end{array}\right\} \quad (2.3)$$

Для складання фазных токаў скарыстаем вектарную дыяграму для напружанняў (гл. рыс. 2.5). Пры складанні фазных токаў атрымаем $I_л = \sqrt{3}\, I_ф$.

Вектарная дыяграма лінейных токаў пры сіметрычнай нагрузцы мае выгляд трохпрамянёвай зоркі, зрушанай адносна зоркі фазных токаў на вугал 30°. Пры складанні лінейных токаў у сістэме раўнанняў (2.3) атрымаем $\dot I_A + \dot I_B + \dot I_C = 0$. Значыць, геаметрычная сума лінейных токаў роўная нулю. Гэты вывад застаецца сапраўдным і для нераўнамернай нагрузкі.

Пры злучэнні трохвугольнікам фазныя нагрузкі паводзяць сябе незалежна адна ад другой, бо кожная падключана да двух

лінейных правадоў. Фазны ток пры дадзеным напружанні залежыць толькі ад фазнай нагрузкі. Несіметрычная нагрузка пры злучэнні трохвугольнікам не парушае сіметрыі фазных напружанняў.

Трохфазныя рухавікі і трансфарматары могуць злучацца як зоркай, так і трохвугольнікам. Дваякі спосаб падключэння рухавікоў трохфазнага току дазваляе шырока выкарыстоўваць іх на практыцы. Калі фазныя абмоткі рухавікоў разлічаны на напружанне 220 В, то ў сетку з лінейным напружаннем 380 В яны падключаюцца зоркай, а ў сетку з лінейным напружаннем 220 В — трохвугольнікам, і ў пашпарце рухавіка ўказваецца Y/Δ — 380/220. Абмоткі генератара трохвугольнікам злучаюцца рэдка, паколькі пры нязначнай несіметрычнасці сістэмы або несінусоіднасці змянення фазных ЭРС у абмотках генератара, злучаных трохвугольнікам, будзе праходзіць унутраны ток.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зменяцца фазныя напружанні на сіметрычных нагрузках, калі іх пераключыць з зоркі на трохвугольнік?

Адказ: Павялічацца ў $\sqrt{3}$ разоў.

2. Як зменяцца лінейныя токі ў ланцугу пры пераключэнні сіметрычнай нагрузкі з зоркі на трохвугольнік?

Адказ: Павялічацца ў 3 разы.

3. Як змяніцца магутнасць у ланцугу трохфазнага току пры пераключэнні нагрузкі з зоркі на трохвугольнік?

Адказ: Павялічыцца ў 3 разы.

4. Як будзе працаваць трохфазны асінхронны рухавік, у пашпарце якога напісана Y/Δ — 380/220, калі: а) у сетку з $U_л$ = 220 В падключыць яго зоркай; б) у сетку з $U_л$ = 380 В падключыць яго трохвугольнікам?

Адказ: а) з паніжанай магутнасцю — фазнае напружанне 127 В; б) можа згарэць — фазнае напружанне 380 В.

5. Тры гірлянды лямпаў падключаны ў трохфазную сетку. Як падключаны гірлянды лямпаў у сетку і што з'явілася прычынай таго, што: а) дзве гірлянды лямпаў сталі гарэць напаўнакалу; б) адна гірлянда лямпаў патухла, а дзве другія пачалі гарэць менш ярка?

Адказ: а) гірлянды лямпаў падключаны трохвугольнікам і адна фаза адключылася; б) гірлянды лямпаў падключаны зоркай і адна фаза адключылася.

6. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U_л$ = 220 В падключаны трохвугольнікам тры нагрузкі з супраціўленнямі: r_1 = 20 Ом; x_{L1} = 15 Ом; r_2 = 16 Ом; x_{c2} = 14 Ом; r_3 = 50 Ом. Вызначыць фазныя і лінейныя токі.

Адказ: $\dot{I}_{AB} = 7{,}04 - j5{,}28$ А; $I_{AB} = 8{,}8$ А; $\dot{I}_{BC} = 1{,}99 - j10{,}13$ А; $I_{BC} = 10{,}32$ А; $\dot{I}_{CA} = -2{,}2 + j3{,}8$ А; $I_{CA} = 4{,}39$ А; $\dot{I}_A = 9{,}24 - j9{,}08$ А; $I_A \approx 12{,}95$ А; $\dot{I}_B \approx -5{,}05 - j4{,}85$ А; $I_B = 7$ А; $\dot{I}_C = -4{,}19 + j13{,}93$ А; $I_C \approx 14{,}55$ А.

7. Тры прымальнікі з супраціўленнем $Z = 3 + j4$ Ом кожны падключаны ў сетку трохвугольнікам. Вызначце комплексныя значэнні і модулі фазных напружанняў, фазных і лінейных токаў, калі дзейнае значэнне токаў у кожнай фазе $I_ф = 20$ А.

А д к а з: $\dot{U}_{AB} = U_{AB} = 100$ В; $\dot{U}_{BC} = -50 - j86{,}6$ В; $U_{BC} = 100$ В; $\dot{U}_{CA} = -50 + j86{,}6$ В; $U_{CA} = 100$ В; $\dot{I}_{AB} = 12 - j16$ А; $I_{AB} = 20$ А; $\dot{I}_{BC} = -19{,}86 - j2{,}39$ А; $I_{BC} = 20$ А; $\dot{I}_{CA} = 7{,}86 + j18{,}39$ А; $I_{CA} = 20$ А; $\dot{I}_A = 4{,}14 - j34{,}39$ А; $I_A = 34{,}64$ А; $\dot{I}_B = -31{,}86 + j13{,}61$ А; $I_B = 34{,}64$ А; $\dot{I}_C = 27{,}72 + j20{,}78$ А; $I_C = 34{,}64$ А.

2.4. Магутнасць трохфазнага ланцуга пераменнага току

Комплексная магутнасць трохфазнага ланцуга пераменнага току пры несіметрычнай нагрузцы роўная суме комплексных магутнасцей асобных фаз $\tilde{S} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C = P_A + jQ_A + P_B + jQ_B + P_C + jQ_C = P_A + P_B + P_C + j(Q_A + Q_B + Q_C)$, дзе актыўная магутнасць P роўная арыфметычнай суме актыўных магутнасцей фаз, а рэактыўная магутнасць Q — алгебраічнай суме рэактыўных магутнасцей фаз.

Пры сіметрычнай нагрузцы трохфазнага ланцуга комплексныя магутнасці фаз роўныя паміж сабой: $\tilde{S} = 3\tilde{S}_ф = 3P_ф + 3jQ_ф$. Запішам комплексную магутнасць трохфазнага ланцуга ў трыганаметрычным выглядзе: $\tilde{S} = 3I_ф U_ф \cos\varphi + 3jI_ф U_ф \sin\varphi$. Выразім фазныя значэнні току і напружання праз лінейныя, атрымаем агульную формулу магутнасці трохфазнага ланцуга для злучэння нагрузкі зоркай і трохвугольнікам: $\tilde{S} = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos\varphi + \sqrt{3}\, U_л I_л \sin\varphi$, дзе для злучэння фазных нагрузак зоркай $I_ф = I_л$, а $U_ф = U_л/\sqrt{3}$; для злучэння фазных нагрузак трохвугольнікам $I_ф = I_л/\sqrt{3}$, а $U_ф = U_л$. Звычайна індэксы пры U і I не ставяцца, і формула комплекснай магутнасці трохфазнага ланцуга мае выгляд $S = \sqrt{3}\, UI \cos\varphi + \sqrt{3}\, UI \sin\varphi$, дзе актыўная магутнасць $P = \sqrt{3}\, UI \cos\varphi$, рэактыўная $Q = \sqrt{3}\, UI \sin\varphi$, а модуль магутнасці $S = \sqrt{3}\, UI$.

1. Ці зменіцца магутнасць трохфазнага прымальніка пры пераключэнні яго з Y на Δ?

А д к а з: Павялічыцца ў 3 разы.

2. Два прымальнікі, супраціўленні фаз якіх адпаведна роўныя $Z_1 = 8 + j\,6$ Ом і $Z_2 = 6 + j\,8$ Ом, падключаны ў трохфазную сетку. Ці аднолькавую магутнасць будуць спажываць прымальнікі?

А д к а з: $S_1 = S_2$; $P_1 > P_2$; $Q_1 < Q_2$.

3. У трохфазную сетку з $U_л = 380$ В падключаны трохвугольнікам трохфазны прымальнік. Вызначце актыўную, рэактыўную і поўную магутнасці прымальніка, $\cos\varphi$, калі супраціўленне фаз прымальніка $Z = 100\,e^{j36,87^\circ}$ Ом.

А д к а з: $P = 3465,6$ Вт; $Q = 2599,2$ ВАр; $S = 4332$ В·А; $\cos\varphi = 0,8$.

4. У трохфазную сетку з $U_л = 220$ В падключаны трохвугольнікам тры прымальнікі з супраціўленнямі: $Z_1 = 5\,e^{j36,87^\circ}$ Ом; $Z_2 = 10\,e^{j53,13^\circ}$ Ом; $Z_3 = 20$ Ом. Вызначце комплексныя значэнні і модулі токаў у прымальніках, комплексную, актыўную і рэактыўную магутнасці і $\cos\varphi$ кожнага прымальніка.

А д к а з: $\dot I_{AB} = 44\,e^{-j36,87^\circ}$ А; $I_{AB} = 44$ А; $\dot I_{BC} = 22\,e^{-j173,13^\circ}$ А; $I_{BC} = 22$ А; $\dot I_{CA} = 11\,e^{j120^\circ}$ А; $I_{CA} = 11$ А; $S_{AB} = 9680\,e^{j36,87^\circ}$ В·А; $P_{AB} = 7744$ Вт; $Q_{AB} = 5808$ ВАр; $\cos\varphi = 0,8$; $\tilde S_{BC} = 4840\,e^{j35,13^\circ}$ В·А; $P_{BC} = 2904$ Вт; $Q_{BC} = 3872$ ВАр; $\cos\varphi = 0,6$; $\tilde S_{CA} = 2420$ Вт; $P_{CA} = 2420$ Вт; $Q_{CA} = 0$; $\cos\varphi = 1$.

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Вывучэнне трохфазных ланцугоў, злучаных зоркай і трохвугольнікам

М э т а р а б о т ы: даследаваць трохфазную сістэму пры злучэнні прымальнікаў зоркай і трохвугольнікам, устанавіць эксперыментальна ўзаемасувязь паміж лінейнымі і фазнымі велічынямі і навучыцца выконваць разлікі трохфазнага ланцуга.

У працэсе работы студэнты павінны навучыцца падключаць у сетку прымальнікі зоркай і трохвугольнікам, вымяраць лінейныя і фазныя токі і напружанні, вызначаць сувязь паміж імі пры сіметрычнай і несіметрычнай нагрузках.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 2.2 і 2.3 падручніка.

Пры **злучэнні прымальнікаў зоркай** у выніку адключэння адной фазы ў трохправадным ланцугу прымальнікі дзвюх другіх фаз апынуцца злучанымі паслядоўна і трапяць пад лінейнае напружанне. У чатырохправадным ланцугу адключэнне адной фазы не прыводзіць да змянення фазных напружанняў на другіх прымальніках незалежна ад іх супраціўленняў.

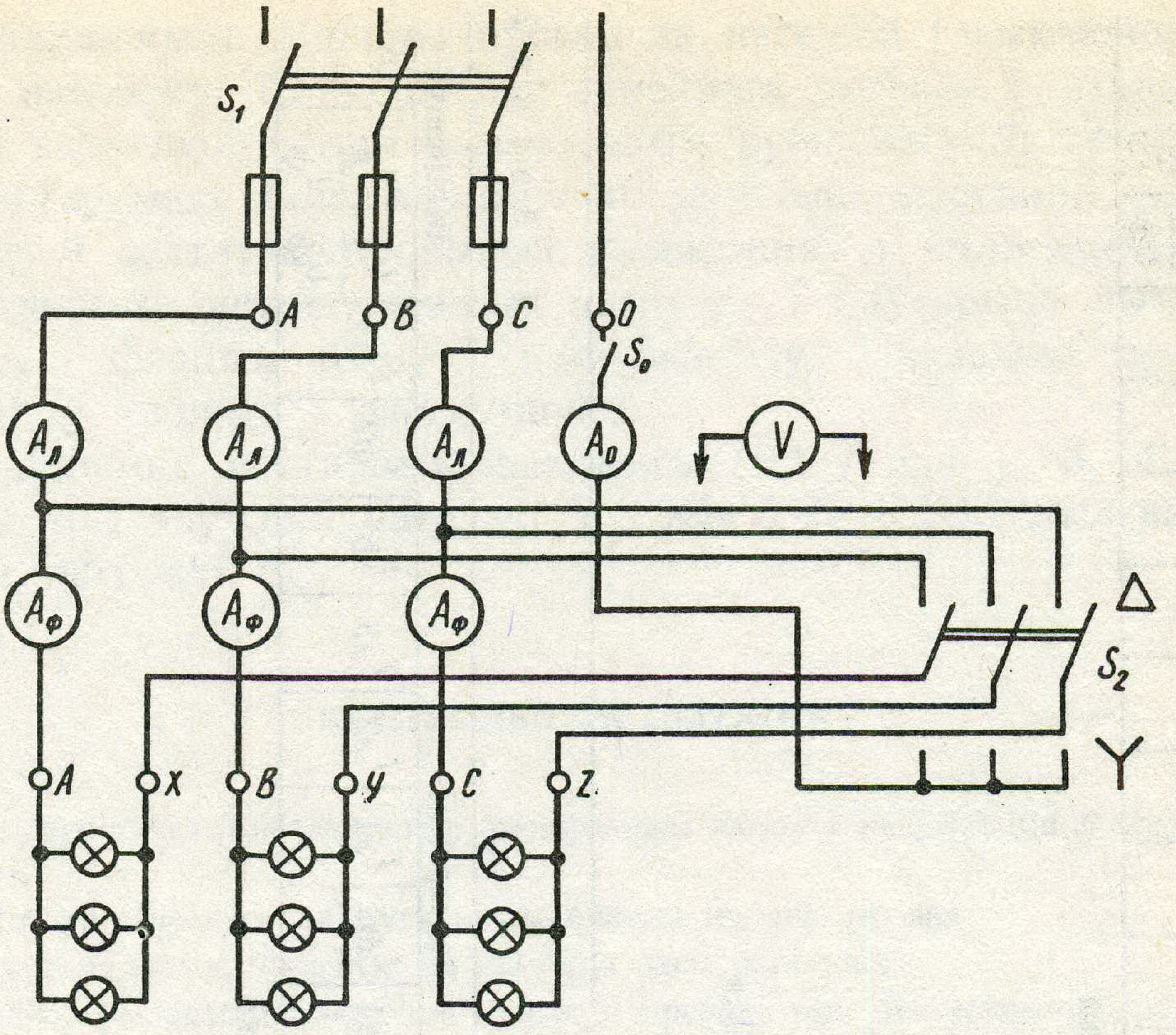
Пры кароткім замыканні адной фазы ў трохправадным ланцугу прымальнікі двух другіх фаз апынуцца пад лінейным напружаннем. У чатырохправадным ланцугу кароткае замыканне адной фазы прывядзе да кароткага замыкання фазы генератара, і фазныя абмоткі генератара (трансфарматара) могуць згарэць.

Пры **падключэнні сіметрычнай нагрузкі трохвугольнікам** $U_ф = U_л$, а $I_л = \sqrt{3}\, I_ф$. Напружанне на прымальніку павялічыцца ў $\sqrt{3}$ разы ў параўнанні з напружаннем на прымальніку пры злучэнні зоркай. Ток у прымальніку таксама павялічыцца ў $\sqrt{3}$ разы, а ў лінейным провадзе ў 3 разы. Магутнасць у прымальніку таксама павялічыцца ў 3 разы.

Пры адключэнні аднаго лінейнага провада дзве фазныя нагрузкі акажуцца злучанымі паслядоўна, і на кожнай фазе пры сіметрычнай нагрузцы напружанне будзе роўнае палавіне лінейнага. Адпаведна і ток у гэтых фазных нагрузках паменшыцца ў 2 разы. Рэжым работы трэцяй фазы не зменіцца. Пры адключэнні адной фазнай нагрузкі рэжым дзвюх другіх фаз не нарушыцца, бо яны па-ранейшаму застануцца пад лінейным напружаннем. У час кароткага замыкання адной фазы (фазнай нагрузкі) паміж двума лінейнымі правадамі адбылося кароткае замыканне. Пры гэтым расплавяцца плаўкія засцерагальнікі або спрацуе рэле аўтаматычнага адключэння.

Выкананне работы

1. Збярыце электрычны ланцуг, як паказана на схеме рыс. 2.8. Нагрузкай трохфазнага ланцуга з'яўляецца лямпавы рэастат. Пры павароце трохполюснага рубільніка S_2 уніз нагрузка ўключаецца зоркай, а пры павароце ўверх — трохвугольнікам. Выключальнік S_0 ставіцца на нулявы провад для яго ўключэння і выключэння. Верхнія амперметры ўключаны ў лінейныя правады і вымяраюць



Рыс. 2.8. Схема злучэння нагрузкі трохфазнага ланцуга зоркай і трохвугольнікам

лінейны ток, а ніжнія ўключаны ў фазы і вымяраюць фазны ток. Вальтметр служыць для вымярэння лінейнага і фазнага напружанняў і напружання нейтралі U_N. Мэтазгодна мантаж электрычнага ланцуга выканаць на стэндзе.

2. Рубільнікам S_2 уключыце лямпы зоркай і стварыце сіметрычную нагрузку. Рубільнікам S_1 падключыце сабраны ланцуг у трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U_л$ = 220 В. Вымерайце лінейныя і фазныя напружанні, напружанне зруху нейтралі. Паказанні амперметраў і вальтметраў запішыце ў табл. 1. Выканайце вылічэнні і растлумачце вынікі вылічэнняў.

3. Выканайце пяць доследаў з сіметрычнай нагрузкай і два доследы з несіметрычнай. Атрыманыя вынікі доследаў запішыце ў табліцу і растлумачце.

4. а) Устанавіце сіметрычную нагрузку і пераключыце яе на трохвугольнік, разамкніце ключ S_0 і замкніце рубільнік S_1. Вымерайце лінейныя і фазныя напружанні і запішыце паказанні вальтметраў і амперметраў у табл. 2.

б) Адключыце адзін лінейны провад і паўтарыце вымярэнні лінейных і фазных напружанняў і токаў. Паказанні прыбораў і вылічэнні запішыце ў табліцу і растлумачце.

Т а б л і ц а 1

Нумар доследа	Злучэнне нагрузкі	Вымярэнні														Вылічэнні		
		$U_{л1}$	$U_{л2}$	$U_{л3}$	$U_{ф1}$	$U_{ф2}$	$U_{ф3}$	U_N	$I_{л1}$	$I_{л2}$	$I_{л3}$	$I_{ф1}$	$I_{ф2}$	$I_{ф3}$	I_0	$\frac{U_л}{U_ф}$	$\frac{I_л}{I_ф}$	P
	Сіметрычная нагрузка																	
1	Y0																	
2	Y0 з адключанай фазай																	
3	Y																	
4	Y з адключанай фазай																	
5	Y з кароткім замыканнем фазы																	
	Несіметрычная нагрузка																	
6	Y																	
7	Y0																	

Т а б л і ц а 2

Нумар доследа	Злучэнне нагрузкі	Вымярэнні												Вылічэнні		
		$U_{л1}$	$U_{л2}$	$U_{л3}$	$I_{ф1}$	$I_{ф2}$	$I_{ф3}$	$I_{л1}$	$I_{л2}$	$I_{л3}$	$I_{ф1}$	$I_{ф2}$	$I_{ф3}$	$\frac{U_л}{U_ф}$	$\frac{I_л}{I_ф}$	P
	Сіметрычная нагрузка															
1	Δ															
2	Δ з адключаным лінейным провадам															
3	Δ з адключанай адной фазнай нагрузкай															
	Несіметрычная нагрузка															
4	Δ															

в) Падключыце лінейны провад да нагрузкі і выключце адну фазную нагрузку. Падключэнне лінейнага проваду і выключэнне нагрузкі выконвайце пры выключаным рубільніку S_1. Вымерайце лінейныя і фазныя напружанні і токі. Запішыце паказанні прыбораў у табліцу і растлумачце вынікі вымярэнняў і вылічэнняў.

г) Стварыце несіметрычную нагрузку і паўтарыце вымярэнні лінейных і фазных токаў і напружанняў. Паказанні прыбораў запішыце ў табліцу і растлумачце.

д) Начарціце вектарныя дыяграмы U і I для 1, 3, 4 і 5-га доследаў пры злучэнні нагрузкі Y і для 1-га і 3-га доследаў пры злучэнні нагрузкі Δ.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Якое злучэнне прымальнікаў у трохфазным ланцугу называецца зоркай? Трохвугольнікам?
2. Калі ў трохфазным ланцугу прымяняецца нулявы провад?
3. Чаму ў нулявым провадзе не ставіцца засцерагальнік?
4. Да чаго прывядзе адключэнне нулявога проваду пры несіметрычнай нагрузцы?
5. Як зменяцца напружанні на фазных нагрузках, злучаных зоркай, пры адключэнні аднаго лінейнага (фазнага) проваду?
6. Як зменяцца напружанні на фазных нагрузках пры кароткім замыканні адной фазы сіметрычнай нагрузкі, злучанай зоркай?
7. Да чаго прывядзе абрыў аднаго лінейнага проваду пры злучэнні сіметрычнай нагрузкі трохвугольнікам?
8. Ці зменіцца напружанне на фазных нагрузках, злучаных трохвугольнікам, пры адключэнні адной фазнай нагрузкі?
9. Да чаго прывядзе кароткае замыканне нагрузкі адной фазы пры злучэнні нагрузкі трохвугольнікам?

6. Зак 5287

3

ЭЛЕКТРАВЫМЯРАЛЬНЫЯ ПРЫБОРЫ І ЭЛЕКТРЫЧНЫЯ ВЫМЯРЭННІ

3.1. Класіфікацыя электравымяральных прыбораў

Электравымяральны прыбор — гэта тэхнічная прылада, з дапамогай якой выконваецца вымярэнне той або іншай электрычнай велічыні. Вымераць электрычную велічыню — значыць параўнаць яе з аднароднай велічынёй, прынятай за адзінку. Электравымяральныя прыборы можна класіфікаваць па наступных асноўных адзнаках: метаду вымярэння, прынцыпу дзеяння прыбора, роду вымернай велічыні, роду току, ступені дакладнасці вымярэння і выгляду выдаваемай інфармацыі. Паводле метаду вымярэння электравымяральныя прыборы падзяляюцца на прыборы непасрэднай ацэнкі і прыборы параўнання.

У прыборах непасрэднай ацэнкі шкала праградуявана ў адзінках вымернай велічыні, якая вызначаецца непасрэдна па паказанні стрэлкі на шкале прыбора (амперметра, вальтметра, омметра, гальванометра і інш.).

Да прыбораў параўнання належаць розныя кампенсатары і электравымяральныя масты. У іх значэнне вымернай велічыні параўноўваецца са значэннем вядомай аднароднай велічыні — мерай.

У аснову работы прыбораў непасрэднай ацэнкі пакладзены фізічныя працэсы, якія ствараюць вярчальны момант і перамяшчэнне рухомай сістэмы прыбора. Вярчальны момант можа быць створаны ўзаемадзеяннем магнітнага поля пастаяннага магніта і току ў катушцы, магнітнага поля катушкі з токам і ферамагнетыка, узаемадзеяннем магнітных палёў катушак з токамі, магнітных палёў з індукцыйнымі токамі, узаемадзеяннем зараджаных цел і інш.

У залежнасці ад прыроды фізічнага ўзаемадзеяння ў вымяральным механізме прыбора электравымяральныя прыборы падзяляюцца на магнітаэлектрычныя, электрамагнітныя, электрадынамічныя, індукцыйныя, электрастатычныя, тэрмаэлектрычныя, дэтэктарныя, вібрацыйныя.

Электрычны ток у ланцугу характарызуецца наступнымі велічынямі: сілай току, напружаннем, магутнасцю, энергіяй, частатой і зрухам фаз (пераменны ток). Супраціўленне, індуктыўнасць і ёмістасць, якія характарызуюць электрычны ланцуг, таксама адносяцца да электрычных велічынь. Для вымярэння гэтых электрычных велічынь прымяняюцца электравымяральныя прыборы: амперметры, вальтметры, ватметры, лічыльнікі электрычнай энергіі, частатамеры, фазаметры, а таксама фарадаметры і прыборы для вымярэння індукцыі. У залежнасці ад току электравымяральныя прыборы падзяляюцца на прыборы пастаяннага і пераменнага аднафазнага і трохфазнага току.

Абсалютнай хібнасцю называецца рознасць паміж вымераным ($A_{\text{вым}}$) і сапраўдным (A) значэннямі вымерных велічынь. Такім чынам, каб атрымаць сапраўднае значэнне вымернай велічыні, трэба да вымеранага значэння дадаць абсалютную хібнасць з адваротным знакам, якую называюць *папраўкай*.

Паколькі $\pm \Delta A$, то $A_{\text{вым}} - \Delta A \leq A \leq A_{\text{вым}} + \Delta A$. Значыць, $A = A_{\text{вым}} \pm \Delta A$.

Дакладнасць выкананага вымярэння электрычнай велічыні ацэньваецца не абсалютнай, а адноснай хібнасцю. *Адноснай хібнасцю* называецца стасунак абсалютнай хібнасці да сапраўднага значэння вымернай велічыні, які выражаецца ў працэнтах: $\gamma = (\Delta A/A)\ 100\ \%$.

На практыцы часта адносную хібнасць вымярэння вызначаюць стасункам абсалютнай хібнасці да вымеранага значэння велічыні, значыць, $\gamma = (\Delta A/A_{\text{вым}})\ 100\ \%$. З сказанага бачна, што найменшая адносная хібнасць пры вымярэнні велічынь электравымяральнымі прыборамі атрымліваецца пры адхіленні стрэлкі прыбора на ўсю шкалу. Стрэлачныя электравымяральныя прыборы маюць дзевяць класаў дакладнасці з наступнымі хібнасцямі: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

Клас дакладнасці прыбора — гэта дапушчальная для дадзенага прыбора хібнасць (%), устаноўленая ДАСТам і вызначаемая па формуле

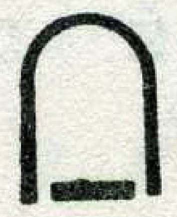
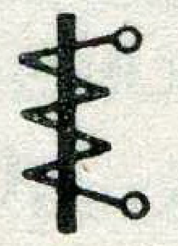
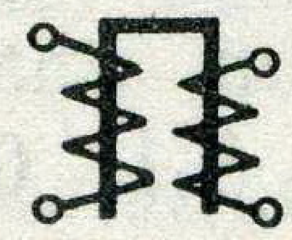
$$\gamma = (\Delta A_{\text{м}}/A_{\text{н}})\ 100\ ,$$

дзе $\Delta A_{\text{м}}$ — максімальная абсалютная хібнасць; $A_{\text{н}}$ — верхняя граніца або максімальнае значэнне шкалы прыбора.

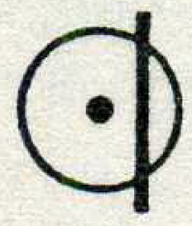
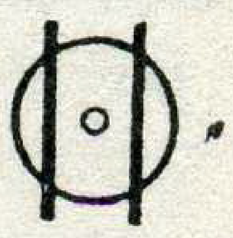
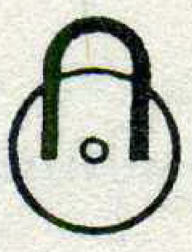
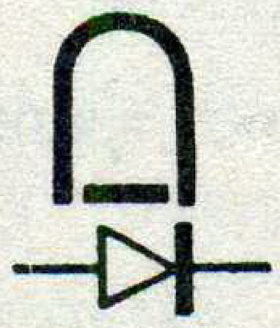
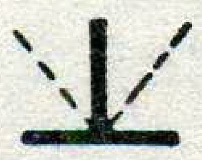
Электравымяральныя прыборы характарызуюцца адчувальнасцю, якая вызначаецца стасункам ліку дзяленняў шкалы прыбора да лікавага значэння вымернай велічыні: $S = n/A_{\text{вым}}$. Велічыня, адваротная адчувальнасці прыбора, называецца *пастаяннай прыбора* або *цаной дзялення* (C). Напрыклад, для амперметра маем $C = 1/S = A_{\text{вым}}/n$. Значэнне вымеранай велічыні вызначаецца памнажэннем пастаяннай прыбора на лік дзяленняў, указаны стрэлкай.

Па віду выдаваемай інфармацыі прыборы падзяляюцца на аналагавыя і лікавыя. На пярэднім баку прыбора маецца шкала падліку вымеранай велічыні, а таксама значкі ўмоўных абазначэнняў: назва прыбора, яго становішча пры рабоце, род току, ДАСТ, клас дакладнасці прыбора, засцярогі ад знешніх магнітных і электрычных палёў. У табл. 3.1 і 3.2 прыведзены асноўныя ўмоўныя абазначэнні на панелях электравымяральных прыбораў і ўказаны іх змест.

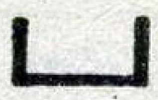
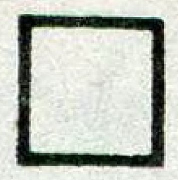
Т а б л і ц а 3.1

Прыбор	Умоўнае абазначэнне	Тып прыбора	Умоўнае абазначэнне: з процідзейнай механічнай сілай	Умоўнае абазначэнне: без процідзейнай механічнай сілы
1	2	3	4	5
Амперметр	A			
Кілаамперметр	kA	Магнітаэлектрычны прыбор з рухомай рамкай		
Міліамперметр	mA			
Мікраамперметр	μA	Магнітаэлектрычны прыбор з рухомым магнітам		
Вальтметр	V			
Кілавальтметр	kV	Электрамагнітны прыбор		
Мілівальтметр	mV			
Мікравальтметр	μV	Электрамагнітны палярызаваны прыбор		
Ватметр	W	Электрадынамічны прыбор		

Заканчэнне табл. 3.1

1	2	3	4	5
Кілаватметр	kW	Ферадынамічны прыбор		
Мегаватметр	MW			
Ватметр рэактыўнай магутнасці	WR	Індукцыйны прыбор		
Кілаватметр рэактыўнай магутнасці	kWR	Магнітаіндукцыйны прыбор		
Лічыльнік кілаватгадзін	kWh	Электрастатычны прыбор		
Омметр	Ω	Тэрмаэлектрычны прыбор		
Кілаомметр	kΩ	Лічбавы прыбор		
Мегаомметр	MΩ	Выпрамляльны прыбор		
Частатамер	Hz	Вібрацыйны прыбор		
Фазометр	φ	Цеплавы прыбор з награвальнай ніткай		

Табліца 3.2

Значэнне дадзеных абазначэнняў	Умоўныя абазначэнні
Прыборы, прызначаныя для работы ў ланцугу:	
толькі пастаяннага току	—
толькі аднафазнага пераменнага току	~
трохфазнага току	≋
пастаяннага і пераменнага току	≂
Прыбор нармальна працуе:	
пры вертыкальным становішчы шкалы	
пры гарызантальным становішчы шкалы	
пры нахіленым становішчы шкалы	
Вымяральны ланцуг, ізаляваны ад корпуса і выпрабаваны напружаннем, напрыклад, 2 кВ	
Прыбор выпрабаванню трываласці ізаляцыі не падлягае	
Засцярога ад знешняга магнітнага поля	
Засцярога ад знешняга электрычнага поля	
Увага! Гл. дадатковыя ўказанні ў пашпарце і інструкцыі па эксплуатацыі	
Асцярожна! Трываласць ізаляцыі вымяральнага ланцуга ў адносінах да корпуса не адпавядае нормам (знак выкананы чырвоным колерам)	

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Па якіх прыметах класіфікуюцца электравымяральныя прыборы?
2. Як падзяляюцца электравымяральныя прыборы на спосабу вымярэння электрычных велічынь? Па прынцыпе дзеяння?
3. Што называецца класам дакладнасці электравымяральнага прыбора?
4. Якія электравымяральныя прыборы адносяцца да першага класа дакладнасці?
5. Як па прыведзенай хібнасці прыбора (класа дакладнасці) вызначыць яго абсалютную хібнасць?
6. Чаму роўныя адносныя хібнасці вымярэнняў, калі пяціамперным амперметрам класа дакладнасці 0,5 першы раз вымералі ток 2 А, а другі — 4 А? Які трэба зрабіць вывад?

А д к а з: $\gamma_1 = 1{,}25\ \%$; $\gamma_2 = 0{,}63\ \%$.

7. Што называецца адчувальнасцю прыбора?
8. Як вызначаецца значэнне вымеранай велічыні па паказанні стрэлкі прыбора?

3.2. Асноўныя вузлы электравымяральных прыбораў

У аналагавых электрамеханічных вымяральных прыборах непасрэднай ацэнкі электрамагнітная энергія, падведзеная да прыбора ў электрычным ланцугу, пераўтвараецца ў механічную энергію вуглавога перамяшчэння рухомай часткі. Гэтыя прыборы складаюцца з электрычнага пераўтваральніка, электрамеханічнага пераўтваральніка і адліковага ўстройства. Электрычны пераўтваральнік пераўтварае электрычную велічыню ланцуга (напружанне, ток, магутнасць, супраціўленне і інш.) у прамежкавую электрычную велічыню (ток, напружанне, магутнасць), якая непасрэдна дзейнічае на вымяральны механізм. Электрамеханічны пераўтваральнік пераўтварае электрычную велічыню ў вярчальны механічны момант рухомай часткі прыбора.

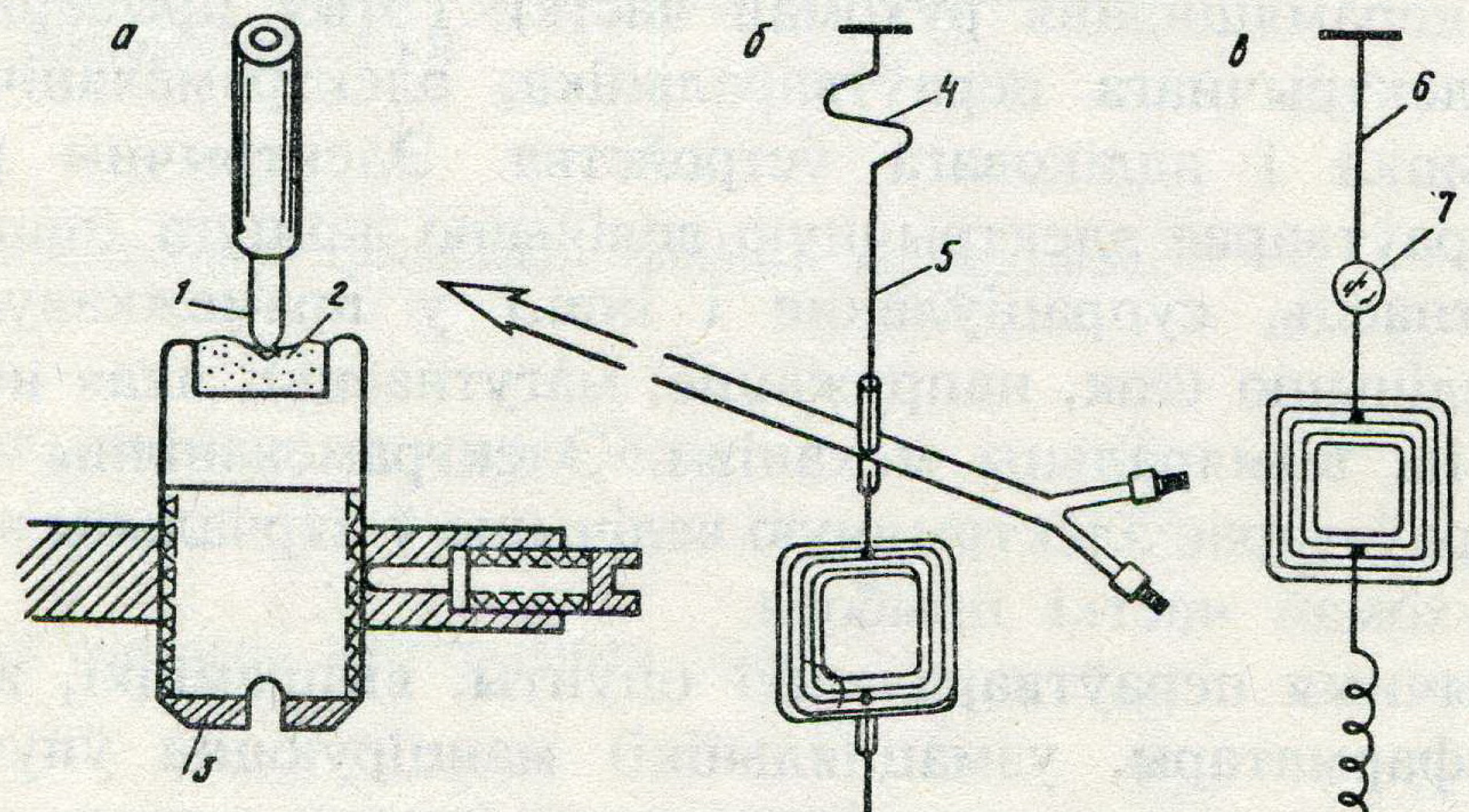
Электрычныя пераўтваральнікі (шунты, выпрамнікі, вымяральныя трансфарматары, узмацняльнікі) манціруюцца ўнутры прыбораў або далучаюцца знадворку да іх клем.

Адліковае устройства складаецца са стрэлачнага або светлавога ўказальніка і шкалы. Шкала — гэта сукупнасць штрыхоў з лікавымі значэннямі. Большасць аналагавых электрамеханічных прыбораў маюць шмат агульных вузлоў і дэталяў і пабудаваны па агульнай схеме пераўтварэння электрычных велічынь у механічны момант, які адхіляе рухомую частку прыбора на вугал α. Агульнымі для гэтых прыбораў з'яўляюцца ўстройствы для

ўстаноўкі рухомай часткі вымяральнага механізма, стварэння процідзейнага моманту, ураўнаважвання і супакаення рухомай часткі.

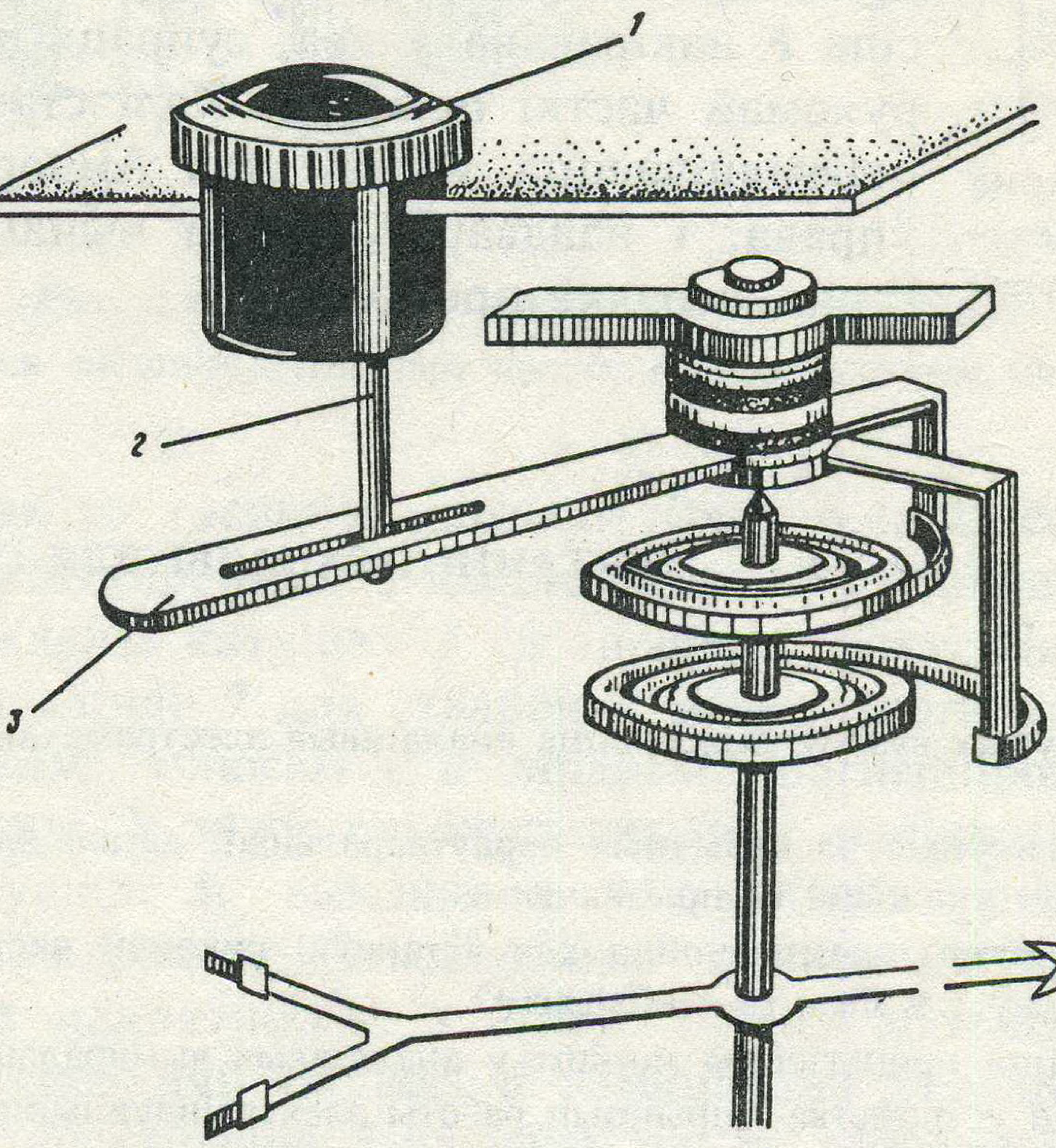
Для свабоднага перамяшчэння рухомай часткі вымяральнага механізма яе ўстанаўліваюць на апорах, разцяжках або падвесцы. Пры ўстаноўцы на апорах рухомая частка (рыс. 3.1, *а*) замацоўваецца на восі лёгкай алюмініевай трубкі. У канцы трубкі запрасоўваюцца два завостраныя з закругленнем кавалкі стальнога дроту, якія называюцца кернерамі *1*. Кернеры апіраюцца на агатавыя або карундавыя падпятнікі *2*, завальцаваныя ў апорны вінт *3*. Недахопам устаноўкі на апорах з'яўляецца трэнне ў падпятніках. У большасці стрэлачных прыбораў рухомая частка вымяральнага механізма ўстанаўліваецца на расцяжках (рыс. 3.1, *б*), якія ўяўляюць сабой дзве тонкія стужкі з бронзавага сплаву. Рухомая частка падвешваецца на дзвюх расцяжках *5*, а іх канцы замацоўваюцца на дзвюх плоскіх спружынах *4*. Расцяжкі служаць для падвядзення току ў рухомую катушку, а іх закручванне стварае процідзейны момант.

У прыборах асабліва высокай адчувальнасці (гальванометрах) рухомая частка вымяральнага механізма ўстанаўліваецца на падвесцы (рыс. 3.1, *в*) — металічнай або кварцавай ніці *6*. У большасці гэтых прыбораў стрэлку замяняе прамень святла ад спецыяльнай крыніцы святла пасля адбіцця ад люстэрка *7*, замацаванага на падвесцы. Закручванне ніці падвескі стварае процідзейны момант. У стрэлачных прыборах з устаноўкай рухомай



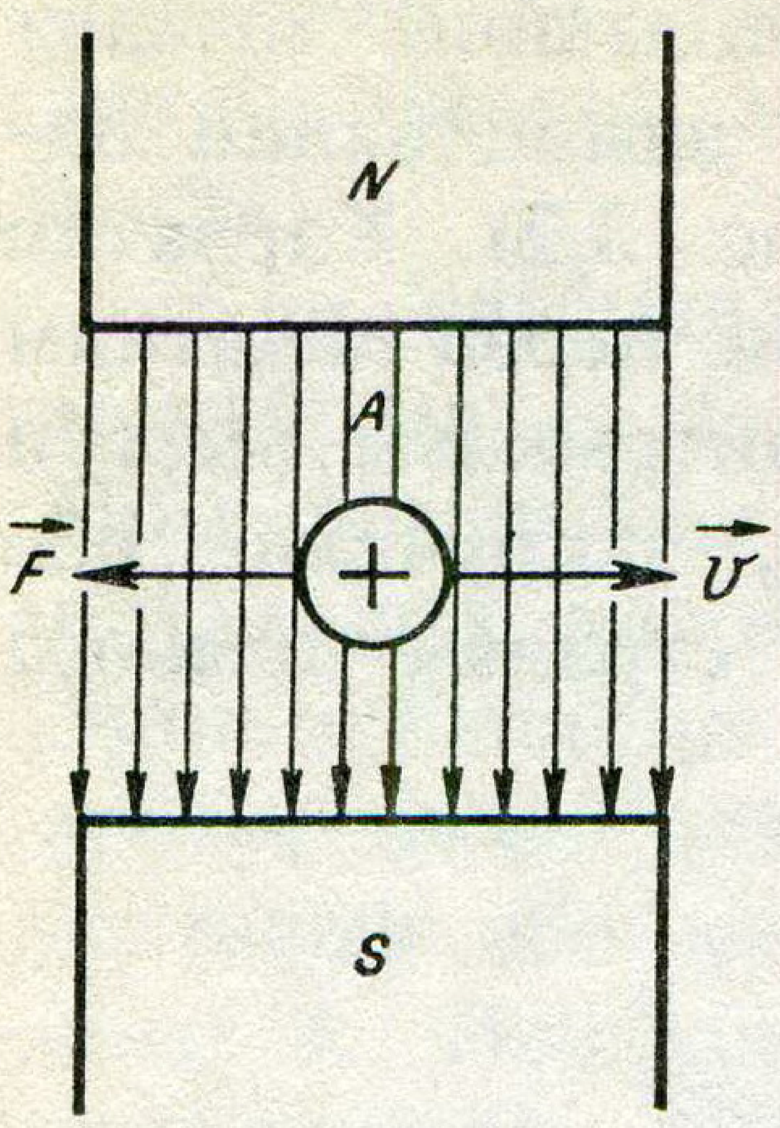
Рыс. 3.1. Устаноўка рухомай часткі вымяральнага механізма:
а — на апорах; *б* — на расцяжках; *в* — на падвесе

часткі вымяральнага механізма на апорах процідзейны момант ствараецца закручваннем спіральнай спружыны, замацаванай адным канцом да восі, а другім да карэктара (рыс. 3.2). Карэктар служыць для ўстаноўкі стрэлкі на нулявое дзяленне перад пачаткам вымярэння. Пры паварочванні вінта *1* яго эксцэнтрыкавы выступ *2* будзе адхіляць павадок *3* управа або ўлева, закручваць або раскручваць спіральную спружыну, паварочваць стрэлку прыбора ўлева або ўправа.



Рыс. 3.2. Схема ўстройства карэктара

Агульнай дэталлю ўсіх электравымяральных прыбораў з'яўляецца супакаяльнік. Супакаяльнікі падзяляюцца на магнітаіндукцыйныя і паветраныя, аднак у вымяральных прыборах яны маюць аднолькавае прызначэнне — гашэнне механічных ваганняў рухомай часткі вымяральнага механізма. Пры падключэнні вымяральнага прыбора ў электрычны ланцуг рухомая частка прыбора атрымлівае механічны імпульс і па інерцыі праходзіць становішча раўнавагі. Пры гэтым узнікае вярчальны момант адваротнага напрамку, і рухомая частка прыбора робіць паварот у адваротным напрамку, працэс паўтараецца, рухомая частка прыбора робіць ваганні. Работа магнітаіндукцыйнага супакаяльніка заснавана на ўзаемадзеянні індукцыйнага току, які ўзбуджаецца ў металічнай рухомай частцы прыбора пры яе перамяшчэнні ў магнітным полі пастаяннага магніта, з гэтым полем. Уявім



Рыс. 3.3. Схема дзейнічання электрамагнітнага супакаяльніка

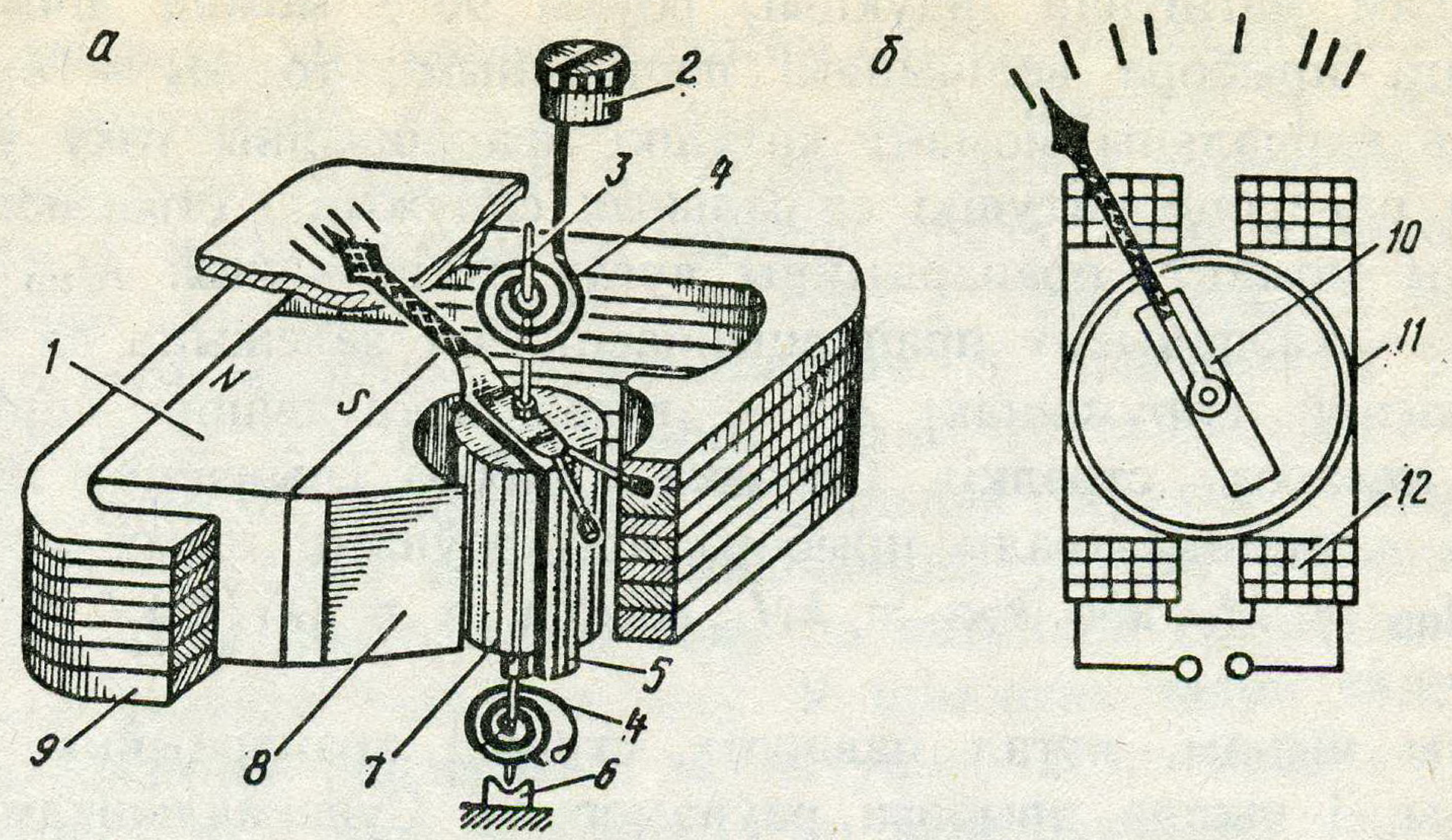
магнітнае поле пастаяннага магніта ў выглядзе двух полюсаў, а паміж імі ўправа перамяшчаецца металічны провад (рыс. 3.3), у якім узбуджаецца індукцыйны ток. Напрамак індукцыйнага току вызначаецца правілам правай рукі, значыць, ток будзе ісці «ад нас». На праваднік з токам у магнітным полі дзейнічае сіла Ампера, напрамак якой вызначаецца правілам левай рукі. Па правілу левай рукі сіла F накіравана ўлева, супраць перамяшчэння рухомай часткі прыбора. Калі стрэлка прыбора перамяшчаецца ўлева, сіла Ампера накіравана ўправа, і наадварот. Такім чынам гасіцца ваганне стрэлкі прыбора.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх асноўных вузлоў складаюцца аналагавыя электрамеханічныя вымяральныя прыборы?
2. Назавіце асноўныя электрычныя пераўтваральнікі, дэталі электрамеханічных пераўтваральнікаў, укажыце іх прызначэнне.
3. Якія ўстройствы прызначаюцца для ўстаноўкі рухомай часткі вымяральнага механізма прыбораў і ў чым іх асаблівасці?
4. Як ствараецца процідзейны момант у аналагавых вымяральных прыборах?
5. Растлумачце ўстройства і прынцып работы электраіндукцыйнага і паветранага супакаяльніка.
6. Для чаго служыць карэктар? Як устанавіць стрэлку на нуль шкалы?

3.3. Магнітаэлектрычныя прыборы

Магнітаэлектрычныя прыборы складаюцца з дзвюх асноўных частак: пастаяннага магніта і катушкі. Работа вымяральнага механізма магнітаэлектрычных прыбораў заснавана на ўзаемадзеянні катушкі з токам і магнітнага поля пастаяннага магніта. Па сваёй канструкцыі яны падзяляюцца на прыборы з рухомай катушкай і прыборы з рухомым магнітам. Прыборы з рухомай катушкай выконваюцца са знешнім або ўнутраным магнітам.



Рыс. 3.4. Схема магнітаэлектрычных прыбораў:
а — са знешнім магнітным полем; *б* — з рухомым магнітам

У прыборах са знешнім магнітам (рыс. 3.4, *а*) ёсць пастаянны магніт *1* і магнітапровад *9* з цыліндрычнымі вытачкамі на полюсах *8*, якія акружаюць катушку *5* са знешняга боку. Паміж полюсамі знаходзіцца цыліндр *7* для стварэння радыяльнага магнітнага поля ў зазоры паміж полюсам і цыліндрам. Магнітапровад і цыліндр робяцца са сталі. У зазор паміж полюсамі і цыліндрам змяшчаецца рухомая катушка *5*, выкананая ў выглядзе рамкі на тонкім алюмініевым каркасе. Завостраныя канцы паўвосей (керны) апіраюцца на падпятнікі *6* з агату, рубіну або іншага цвёрдага мінералу. На верхняй паўвосі *3* замацавана ўказальная стрэлка. Да паўвосей электрычна ізалявана ад іх прымацаваны дзве закручаныя ў процілеглыя бакі спіральныя спружыны *4*, якія служаць для падводу току да катушкі і стварэння процідзейнага моманту. Верхняя спіральная спружына другім канцом праз павадок звязана з карэктарам *2*, а ніжняя мацуецца да корпуса прыбора. Карэктар служыць для ўстанаўлення стрэлкі на нулявое дзяленне перад пачаткам вымярэння. Пры ўключэнні прыбора ў электрычны ланцуг ў катушцы з'явіцца ток.

Вярчальны момант катушкі з токам

$$M_в = BlIw \sin\alpha\,(D/2)\,,$$

дзе $BlIw \sin\alpha$ — сіла F, якая дзейнічае на катушку з токам у магнітным полі; $D/2$ — радыус катушкі.

Паколькі магнітную індукцыю B у зазоры, l — даўжыню актыўнай часткі правадніка катушкі, w — лік віткоў у катушцы і $\sin\alpha$ (α — вугал паміж нармаллю да плоскасці катушкі і

напрамкам магнітнай індукцыі, роўны 90°) можна лічыць для дадзенага прыбора велічынямі пастаяннымі, то $M_в = k_1I$, гэта значыць вярчальны момант катушкі прапарцыйны току ў ёй.

Пры павароце катушкі спіральныя спружынкі ствараюць процідзейны момант, прапарцыйны вуглу закручвання: $M_{пр} = k_2\alpha$, дзе k_2 — каэфіцыент прапарцыйнасці, які залежыць ад пругкіх уласцівасцей спружынак; α — вугал закручвання спружынак (вугал павароту стрэлкі). Стрэлка прыбора спыняецца на якім-небудзь дзяленні шкалы прыбора пры роўнасці гэтых момантаў, калі $M_{пр} = M_в$ або $k_2\alpha = k_1I$, адсюль $\alpha = (k_1/k_2)\,I = kI$, дзе $k_1/k_2 = k$.

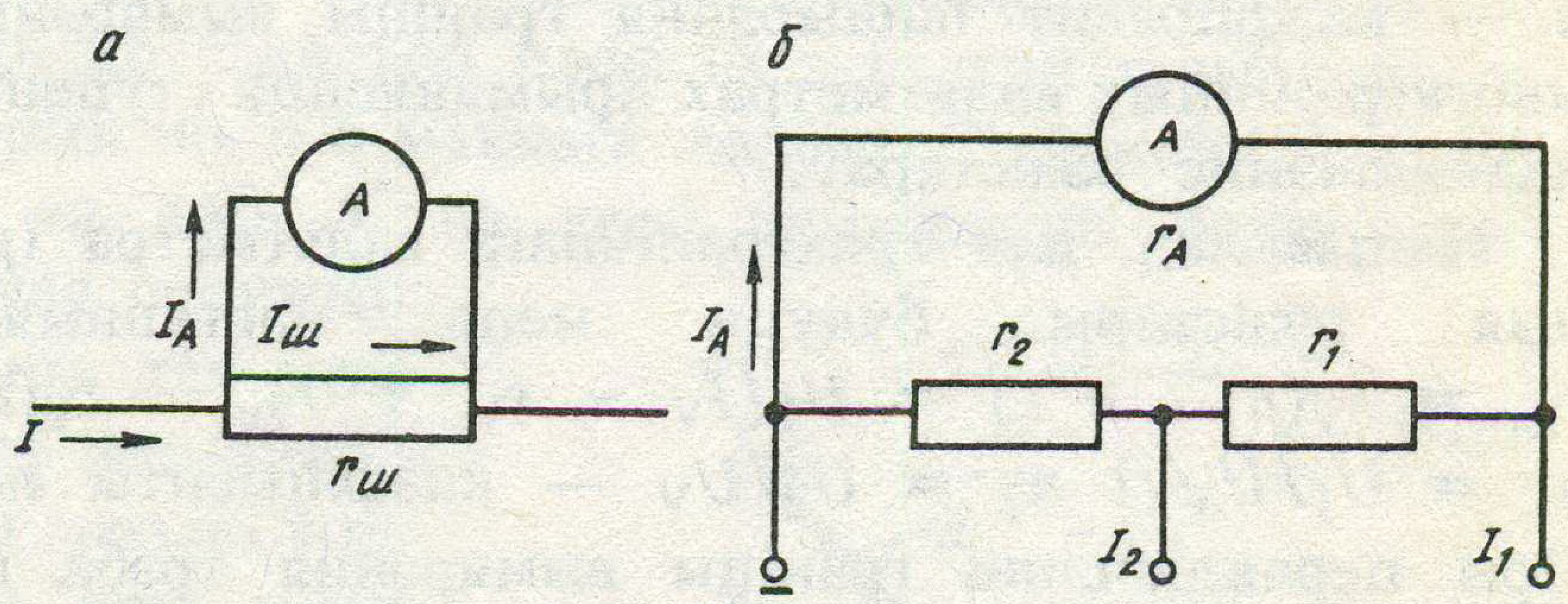
Такім чынам, вугал павароту стрэлкі прапарцыйны току ў катушцы, і шкала прыбора раўнамерная. Супакаяльнікам вымяральнага механізма дадзенага прыбора з'яўляецца алюмініевы каркас рамкі. Пры павароце катушкі з токам у магнітным полі ў алюмініевым каркасе будзе ўзбуджацца індукцыйны ток. Узаемадзеянне гэтых токаў з магнітным полем пастаяннага магніта стварае механічны момант, які тармазіць паварот катушкі. Такім чынам, ваганне рухомай сістэмы хутка затухае. Магнітаэлектрычныя прыборы са знешнім магнітным полем маюць рад дадатных якасцей: раўнамерную шкалу; высокую адчувальнасць, паколькі катушка знаходзіцца ў моцным магнітным полі, і пры нязначным току робіць прыкметнае адхіленне стрэлкі; высокі клас дакладнасці; малую адчувальнасць да ўздзеяння знешніх магнітных палёў з прычыны моцнага магнітнага поля ў зазоры полюсаў.

Да недахопаў прыбораў гэтай сістэмы належыць аднесці адчувальнасць да перагрузкі, бо ток у рухомую катушку падводзіцца праз спіральныя спружынкі, якія могуць нагрэцца і страціць пругкасць або перагарэць, а таксама магчымасць прымянення ґэтых прыбораў толькі для вымярэння велічыняў пастаяннага току.

Павелічэнне адчувальнасці прыбора дасягаецца памяншэннем процідзейнага моманту. З гэтай мэтай у магнітаэлектрычных гальванометрах рухомую сістэму (катушку са стрэлкай) замацоўваюць на расцяжках (бронзавых дроціках). Пры павароце рамкі бронзавыя дроцікі закручваюцца і ствараюць процідзейны момант. Для вымярэння вельмі малых токаў прымяняюцца гальванометры з падвешанай катушкай. Катушка падвешваецца на тонкай металічнай або кварцавай ніці. Пры павароце катушкі ніць падвеса закручваецца і стварае процідзейны момант. Паказанні гальванометра вызначаюцца на знадворнай шкале па адхіленні светлавога праменя, адбітага ад люстэрка, замацаванага на падвесе. Такія гальванометры атрымалі назву люстраных і служаць для вымярэння малых токаў ($1\cdot10^{-9}$ – $1\cdot10^{-14}$ А).

У прыборах з унутраным магнітам пастаянны магніт знаходзіцца ўнутры нерухомай катушкі, якая размяшчаецца ў кальцавым магнітапровадзе. Магнітная індукцыя ў зазоры паміж пастаянным магнітам і магнітапровадам нераўнамерная, што прыводзіць да нелінейнай залежнасці вугла α ад току I. Таму шкала ў прыборах з унутраным магнітам нераўнамерная. У прыборах з рухомым магнітам (рыс. 3.4, *б*) пастаянны магніт *10* замацаваны на восі. На восі таксама замацаваны ўказальная стрэлка і спіральныя спружыны. Рухомая сістэма змяшчаецца ўнутры нерухомай катушкі *12*. Пры праходжанні току па катушцы магніт адхіляецца і стрэлка ўказвае значэнне току. У прыборах такой канструкцыі ток падводзіцца непасрэдна да катушкі, а не праз спіральныя спружынкі, таму яны ўстойлівыя да перагрузак па току. Шкала прыбора нераўнамерная. Рухомая сістэма прыбора змяшчаецца ў медны цыліндр *11*, які служыць супакаяльнікам. Па адчувальнасці і дакладнасці вымярэння прыборы магнітаэлектрычнай сістэмы займаюць першае месца. У спалучэнні з выпрамнікамі і тэрмапераўтваральнікамі яны шырока выкарыстоўваюцца для вымярэння пераменных токаў.

Для пашырэння граніцы вымярэння ў магнітаэлектрычных амперметрах прымяняюцца шунты. Шунты — гэта рэзістары малога супраціўлення, яны падключаюцца паралельна вымяральнаму механізму прыбора (рыс. 3.5). Пры гэтым $I = I_A + I_ш$, дзе I — ток у ланцугу; I_A — ток у амперметры. Калі трэба



Рыс. 3.5. Схема аднагранічнага амперметра з шунтом (*а*), двухгранічнага (*б*)

павялічыць граніцу вымярэння амперметра ў n разоў ($I = nI_A$), тады $nI_A = I_A + I_ш$ або $(n-1) I_A = I_ш$. Паколькі $I_A/I_ш = r_ш/r_A$, то $r_ш = (I_A/I_ш) r_A = r_A/(n-1)$, значыць, супраціўленне шунта павінна быць у $n - 1$ разоў меншае за супраціўленне амперметра. Шунт робіцца з манганіну, які валодае малым тэмпературным каэфіцыентам супраціўлення. На практыцы атрымалі распаўсюджанне многагранічныя шунты, якія падключаюцца па кальцавой схеме. Напрыклад, у двухгранічным амперметры супраціўленні шунтоў $r_{ш1} = r_1 + r_2 = r_A/(n_1 - 1)$, а $r_{ш2} = r_2 = (r_1 + r_A)/(n_2 - 1)$,

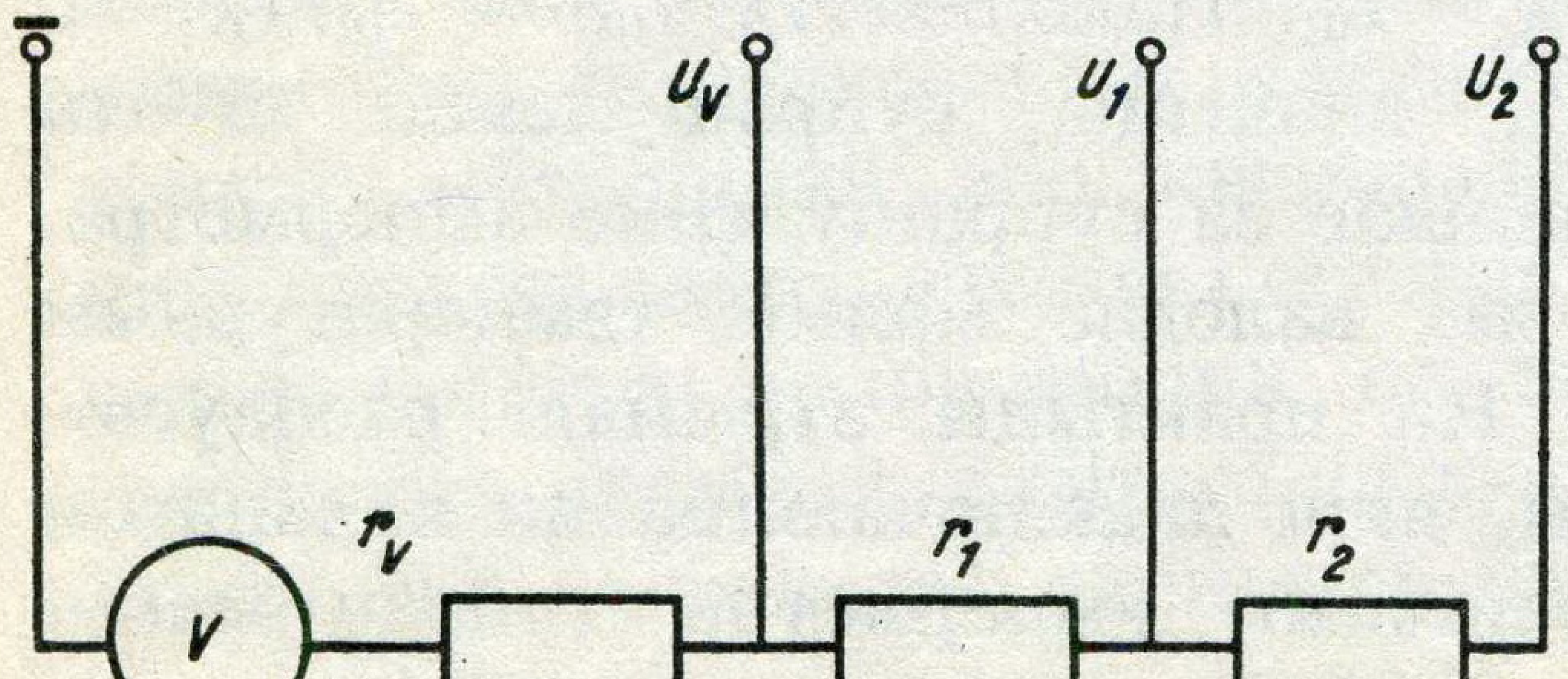
дзе $n_1 = I_1/I_A$ і $n_2 = I_2/I_A$ — каэфіцыенты шунтавання. З гэтых двух раўнанняў можна вызначыць супраціўленні шунтоў $r_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_2(n_1 - 1)} r_A$ і $r_2 = \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} r_A$.

Шунты бываюць унутраныя, уманціраваныя ў корпус амперметра, і знадворныя. У многагранічных амперметрах маюцца розныя шкалы. Калі ў амперметры адна шкала, то пры пераключэнні на другую граніцу патрэбна вызначыць цану дзялення амперметра пры гэтай граніцы вымярэння. Для расшырэння граніцы вымярэння ў магнітаэлектрычных вальтметрах прымяняюцца дабавачныя супраціўленні, якія ўключаюцца паслядоўна з унутраным супраціўленнем вальтметра. Унутранае супраціўленне вальтметра складаецца з супраціўлення катушкі $r_к$, супраціўлення дзвюх спіральных спружынак $r_{спр}$ і рэзістара r_0, гэта значыць $r_V = r_к + r_{спр} + r_0$.

Ток поўнага адхілення стрэлкі вальтметра з'яўляецца велічынёй пастаяннай і звычайна роўны 30—50 мА. Такім чынам, граніца вымярэння напружання $U_V = r_V I_V$. Для пашырэння граніцы вымярэння вальтметра паслядоўна да яго падключаюць дабавачнае супраціўленне $r_д$. Пры гэтым граніца вымярэння напружання $U = I_V(r_V + r_д) = U_V + U_д$. Калі трэба пашырыць граніцу вымярэння ў n разоў ($U = nU_V$), то $nU_V = U_V + U_д$, $U_V(n - 1) = U_д$.

Падзелім гэта выражэнне на $I_в$, атрымаем $r_V(n - 1) = r_д$, дзе n — каэфіцыент пашырэння граніцы вымярэння вальтметра. У многагранічных вальтметрах прымяняецца ступенчатае паслядоўнае падключэнне рэзістараў.

Напрыклад, для трохгранічнага вальтметра (рыс. 3.6) дабавачныя рэзістары будуць мець наступныя супраціўленні: $r_{1д} = r_V(n_1 - 1) = U_1/I_V - r_V$ і $r_{2д} = r_V(n_2 - 1) - r_{1д}$, дзе $n_1 = U_1/U_V$ і $n_2 = U_2/U_V$ — каэфіцыенты пашырэння граніц. Пры пераключэнні граніцы вымярэння трэба вызначыць новую цану дзялення вальтметра, а па паказанні стрэлкі на шкале — значэнне вымяраемага напружання.



Рыс. 3.6. Схема трохгранічнага вальтметра

1. Растлумачце ўстройства і прынцып работы магнітаэлектрычных прыбораў.

2. Чаму магнітаэлектрычныя прыборы непрыгодныя для вымярэння ў ланцугу пераменнага току?

3. Растлумачце, чаму ў магнітаэлектрычных прыборах шкала раўнамерная?

4. Для чаго служыць ў магнітаэлектрычных прыборах спіральная спружына? Карэктар? Полюсныя наканечнікі і стальны цыліндр?

5. Пералічыце станоўчыя бакі і недахопы магнітаэлектрычных прыбораў.

6. Як выкарыстоўваецца вымяральны механізм магнітаэлектрычных прыбораў для вымярэння ў ланцугу пераменнага току?

7. Вылічыце супраціўленне шунта для аднаампернага амперметра з супраціўленнем 0,5 Ом пры пашырэнні граніцы вымярэння да 5 А.

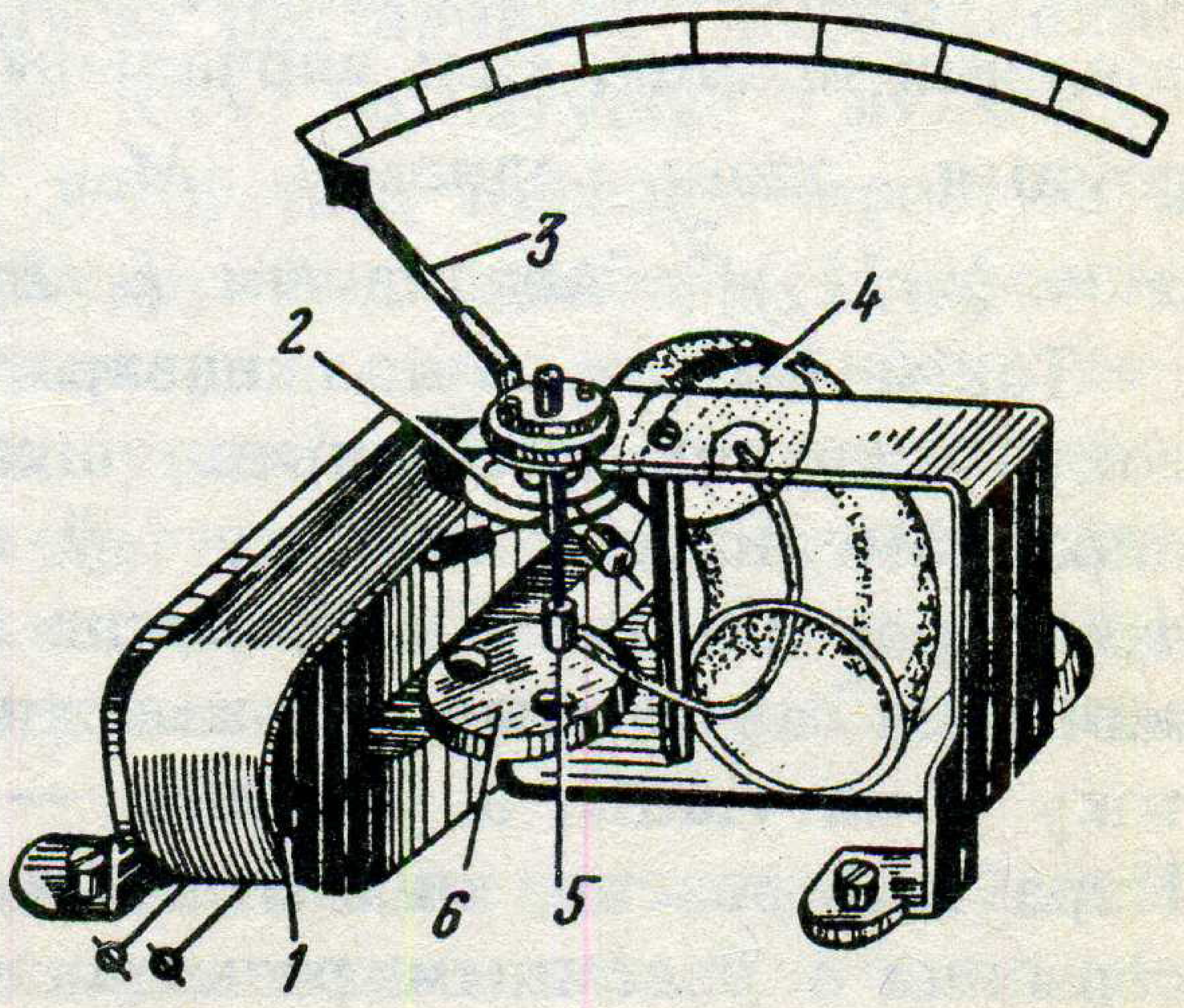
Адказ: $r_ш = 0{,}125$ Ом.

8. Вальтметр з граніцай вымярэння 150 В мае ўнутранае супраціўленне 5 кОм. Якія трэба падключыць дадатковыя супраціўленні для расшырэння граніц вымярэння да 300, 600 В? Як зменіцца пастаянная прыбора пасля падключэння дадатковых супраціўленняў?

Адказ: $r_{д1} = 5$ кОм; $r_{д2} = 15$ кОм. Павялічыцца ў 2 і 4 разы.

3.4. Электрамагнітныя прыборы

Электрамагнітны прыбор (рыс. 3.7) мае нерухомую катушку *1*. Катушка можа быць круглай або плоскай з вузкай шчылінай, у якую ўцягваецца стрыжань *6* з мяккага жалеза. Стрыжань эксцэнтрычна насаджаны на вось *5*, на якой замацаваны ўказальная стрэлка *3* і спіральная спружына *2*. Спружына служыць для ўтварэння процідзейнага моманту і зваротнага адхілення стрэлкі ў пачатковае становішча пры адсутнасці току ў прыборы. Поршань *4* выконвае ролю паветранага супакаяльніка.



Рыс. 3.7. Схема электрамагнітнага прыбора з плоскай катушкай

Прынцып работы электрамагнітных прыбораў заключаецца ў наступным. Ток, які праходзіць па катушцы, стварае магнітнае поле. Жалезны стрыжань *2* намагнічваецца і уцягваецца ў катушку, паварочвае пры гэтым

вось, а разам з ёй стрэлку і поршань *4* паветранага супакаяльніка (дэмпфера). Вярчальны момант у электрамагнітных прыбораў можна лічыць прапарцыйным квадрату току ў катушцы.

Пры ўвядзенні жалезнага стрыжня ўнутр катушкі з токам магнітнае поле катушкі ўзмацніцца, павялічыцца яго энергія. Прырашчэнне энергіі магнітнага поля вымяраецца работай, выкананай па перамяшчэнні стрыжня, значыць,

$$dW = Fdl, \tag{3.1}$$

дзе dW — прырашчэнне энергіі магнітнага поля, роўнае $I^2dL/2$; F — сіла ўзаемадзеяння магнітнага поля катушкі з токам і жалезнага стрыжня; dl — даўжыня дугі, роўная $rd\alpha$; r — адлегласць паміж воссю вярчэння і дапусцімым пунктам прыкладання сілы; α — вугал павароту стрыжня.

З раўнання (3.1) можна запісаць:

$$I^2dL/2 = Frd\alpha \text{ або } M_в = Fr = (I^2/2)\,(dL/d\alpha)\,,$$

дзе $dL/d\alpha$ — хуткасць змянення індуктыўнасці катушкі пры павароце стрыжня, якая залежыць ад узаемнага размяшчэння стрыжня і катушкі, а таксама ад формы самога стрыжня.

Падабраўшы адпаведную форму стрыжня, можна лічыць $dL/d\alpha$ велічынёй пастаяннай. Такім чынам, вярчальны момант $M_в = k_1I^2$.

Процідзейны механічны момант спіральнай спружыны $M_{пр} = k_2\alpha$, дзе k_2 — каэфіцыент прапарцыйнасці, які залежыць ад пругкасці спружыны; α — вугал закручвання спружыны — вугал адхілення стрэлкі. Стрэлка прыбора спыніцца на якім-небудзь дзяленні шкалы, калі вярчальны і процідзейны моманты акажуцца роўныя адзін аднаму: $M_{пр} = M_в$ або $k_2\alpha = k_1I^2$, адкуль $\alpha = (k_1/k_2)I^2$. Абазначым k_1/k_2 праз k, атрымаем $\alpha = kI^2$.

Такім чынам, вугал павароту стрэлкі прапарцыйны квадрату току ў катушцы. Значыць, шкала ў электрамагнітных прыборах нераўнамерная: у пачатку і ў канцы на адзінку даўжыні шкалы дзяленняў больш. Павелічэнне дзяленняў у пачатку шкалы тлумачыцца квадратычнай залежнасцю вугла павароту стрэлкі ад току ў катушцы, а ў канцы — магнітнай насычанасцю стрыжня. Нераўнамернасць шкалы крыху выпраўляецца падборам формы стрыжня і ўзаемным размяшчэннем катушкі і стрыжня.

Пры павароце восі поршань паветранага супакаяльніка перамяшчаецца ўнутры цыліндра, і супраціўленне паветра тармозіць перамяшчэнне, дзякуючы чаму гасяцца ваганні стрэлкі.

Электрамагнітныя прыборы служаць для вымярэння велічыняў як пастаяннага, так і пераменнага току. Пры праходжанні пераменнага току па катушцы прыбора вярчальны момант у кожны момант часу будзе прапацыйны квадрату імгненнага значэння току: $m_в = ki^2$. З прычыны значнай інерцыі рухомай часткі прыбора вярчальны момант стрыжня будзе вызначацца сярэднім значэннем вярчальнага моманту за перыяд:

$$M_в = \frac{1}{T}\int_0^T m_в dt = \frac{1}{T}\int_0^T k_1 i^2 dt =$$

$$= \frac{k_1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{k_1}{T}\int_0^T I^2 (1 - \cos 2\omega t) dt =$$

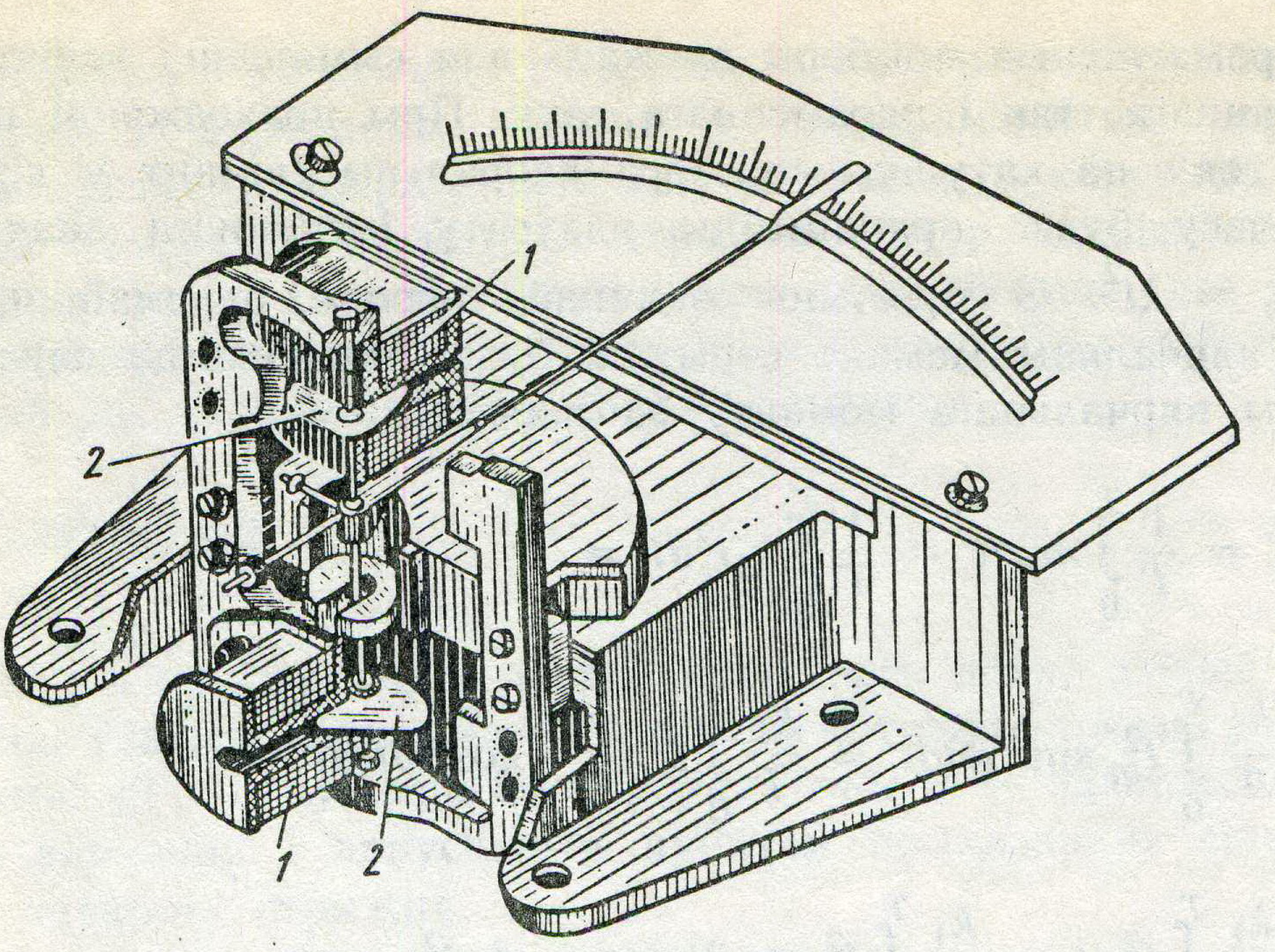
$$= \frac{k_1}{T}\int_0^T I^2 dt - \frac{k_1}{T}\int_0^T I^2 \cos 2\omega t dt = k_1 I^2 .$$

Такім чынам, і для пераменнага току можна запісаць $\alpha = kI^2$, значыць, вугал адхілення стрэлкі прыбора прапарцыйны квадрату дзейнага значэння пераменнага току.

Электрамагнітныя прыборы са звычайным жалезным стрыжнем маюць невысокі клас дакладнасці і шырока прымяняюцца ў якасці шчытавых прыбораў і для тэхнічных вымярэнняў, якія не патрабуюць высокай дакладнасці. Прыборы з пермалоевым стрыжнем маюць некалькі вышэйшы (0,5—1) клас дакладнасці і прымяняюцца ў лабараторнай практыцы.

Да дадатных якасцей электрамагнітных прыбораў трэба аднесці прыгоднасць для вымярэння ў ланцугах пастаяннага і пераменнага току, устойлівасць да перагрузкі па току, бо катушка з'яўляецца нерухомай і можа быць зроблена з тоўстага праваду; простую і дастаткова моцную механічную канструкцыю прыбора. Недахопы электрамагнітных прыбораў: нераўнамерная шкала; наяўнасць астаткавага намагнічвання стрыжня; уплыў знешняга магнітнага поля на паказанне прыбора, паколькі ўласнае магнітнае поле катушкі невялікае; малая адчувальнасць, бо малы ток у катушцы не можа выклікаць відавочнага адхілення стрэлкі прыбора; невысокая дакладнасць.

Для ўстаранення ўплыву знешняга магнітнага поля на паказанне электрамагнітныя прыборы робяцца экранаванымі або астатычнымі. У экранаваных прыборах токаправодная і рухомая часткі змяшчаюцца ў жалезны цыліндр, які з'яўляецца экранам для знешняга магнітнага поля. У астатычных прыборах (рыс. 3.8) маюцца дзве



Рыс. 3.8. Схема астатычнага электрамагнітнага прыбора

катушкі *1*, размешчаныя вертыкальна адна над другой з процілеглых бакоў адносна восі, і два жалезныя стрыжні *2*, замацаваныя эксцэнтрычна на вертыкальнай восі. Пры праходжанні току па катушках у іх ствараюцца магнітныя палі, накіраваныя ў процілеглыя бакі. Стрыжні намагнічваюцца магнітным полем сваёй катушкі і ўцягваюцца ўнутр яе. На вось дзейнічае пара сіл, і вось паварочваецца. Знешняе магнітнае поле ўзмацняе магнітнае поле адной катушкі і паслабляе магнітнае поле другой катушкі. У выніку вярчальны момант сіл, абумоўлены знешнім магнітным полем, блізкі да нуля. Такім чынам, устараняецца ўплыў знешняга магнітнага поля на паказанне прыбора.

Астатыраванне звычайна прымяняюць у пераносных лабараторных прыборах. Шунты ў электрамагнітных амперметрах не прымяняюцца з-за вялікага скарыстання імі энергіі. Для пашырэння граніц вымярэння амперметраў прымяняюцца вымяральныя трансфарматары току. У лабараторнай практыцы звычайна даводзіцца перарабляць амперметры з адной граніцы вымярэння на другую. У гэтым выпадку абмотку катушкі замяняюць новай з большай (меншай) колькасцю віткоў і адпаведна з меншым (большым) папярэчным сячэннем проваду. Колькасць віткоў падбіраецца так, каб намагнічвальная сіла катушкі прыбора, якая выражаецца ў ампер-вітках, засталася ранейшай. Напрыклад, амперметр на 3 А мае 70 віткоў намагнічвальнай катушкі. Для пашырэння граніцы вымярэння амперметра да 5 А неабходна ўзяць 42 віткі больш тоўстага проваду так, каб намагнічвальная сіла засталася без змянення (5 А × 42 в = 3 А × 70 в).

У вальтметрах абмотка катушкі робіцца з тонкага ізаляванага праваднiка з вялікай колькасцю віткоў. Для вымярэння высокіх напружанняў паслядоўна з катушкай падключаюць дабавачнае супраціўленне ўнутры вальтметра або знешняе дабавачнае супраціўленне. Пры вымярэнні напружанняў вышэй 600 В вальтметры падключаюцца ў сетку праз вымяральныя трансфарматары напружання.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх асноўных частак складаюцца электрамагнітныя прыборы?
2. На якім прынцыпе заснавана дзеянне электрамагнітных прыбораў?
3. Чым тлумачыцца нераўнамернасць шкалы электрамагнітных прыбораў?
4. Як растлумачыць прыдатнасць электрамагнітных прыбораў для вымярэння велічынь пастаяннага і пераменнага току?
5. Пералічыце дадатныя бакі і недахопы электрамагнітных прыбораў.
6. Якім чынам устараняецца ўплыў знешняга магнітнага поля ў астатычных электрамагнітных прыборах?
7. Як пашырыць граніцы вымярэння амперметраў электрамагнітнай сістэмы?
8. Вызначце ўнутранае супраціўленне прыбора і дадатковае супраціўленне, калі ток 30 мА адхіляе стрэлку прыбора на ўсю шкалу. Граніцы вымярэння прыбора з дадатковым супраціўленнем — 450 В, а без яго — 150 В.

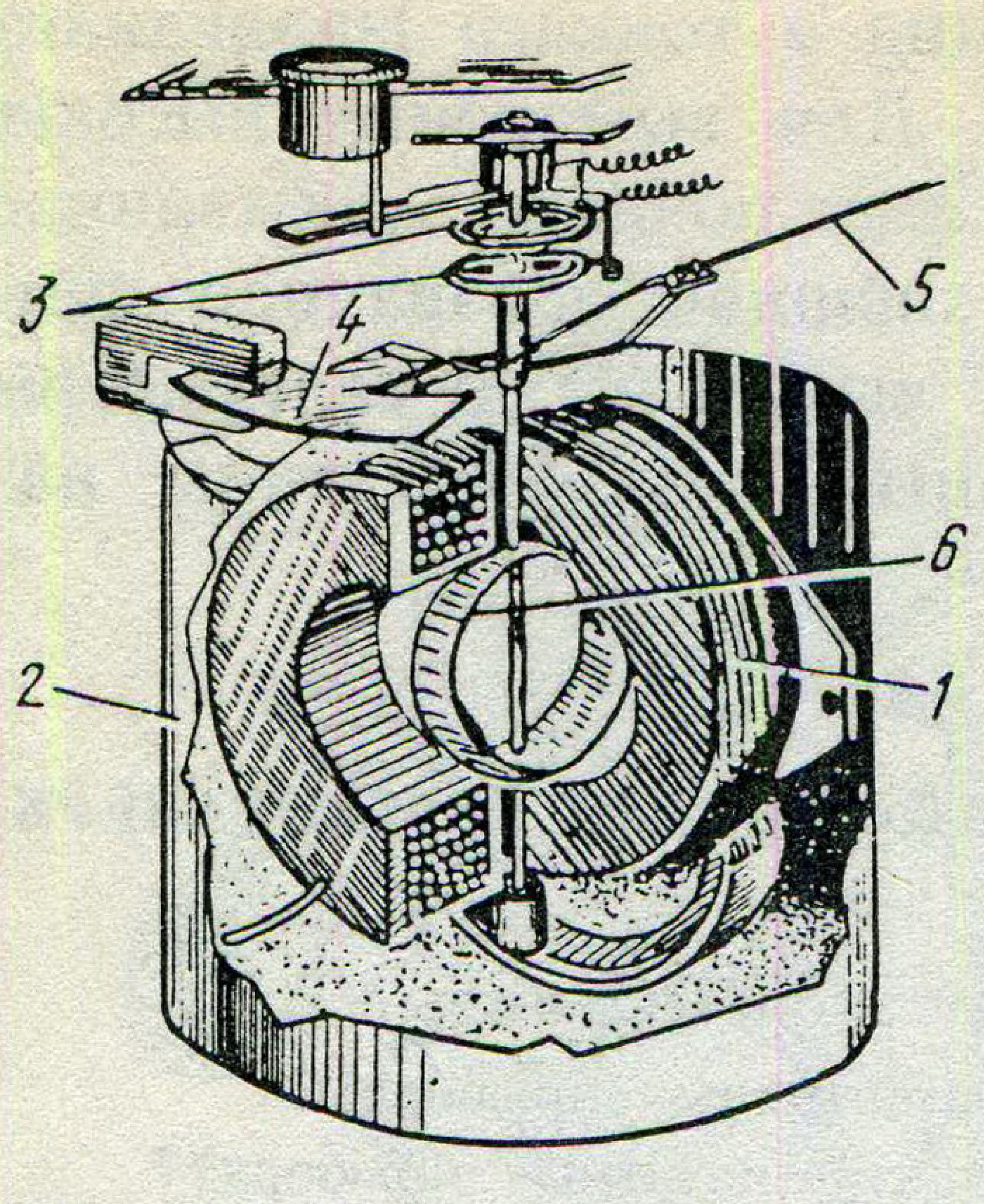
А д к а з: $r_1 = 5$ кОм; $r_2 = 10$ кОм.

9. Шматгранічны вальтметр (150, 300, 450 і 600 В) на шкале мае надпіс «ток 30 мА». Вызначце супраціўленне паміж першай і наступнай клемамі прыбора. Начарціце схему прыбора.

А д к а з: 5 кОм; 10 кОм; 15 кОм; 20 кОм.

3.5. Электрадынамічныя і ферадынамічныя прыборы

У электрадынамічных прыборах (рыс. 3.9) маюцца дзве катушкі. Адна катушка нерухомая, з тоўстага ізаляванага праваду, складаецца з дзвюх секцый *1*, паслядоўна злучаных паміж сабой. Другая рухомая катушка *6* наматана з тонкага ізаляванага праваду і замацавана на восі. На восі таксама замацаваны: указальная стрэлка *5*, алюмініевая пласцінка *4* электрамагнітнага супакаяльніка і дзве ізаляваныя спіральныя спружынкі *3*. Работа электрадынамічных прыбораў заснавана на прынцыпе ўзаемадзеяння дзвюх катушак з токам. Пры праходжанні току па катушках



Рыс. 3.9. Схема экраніраванага электрадынамічнага прыбора

рухомая катушка паварочваецца так, каб яе плоскасць супала з плоскасцю нерухомай катушкі. Разам з катушкай паварочваюцца ўказальная стрэлка і алюмініевая пласцінка электрамагнітнага супакаяльніка. Электрадынамічныя прыборы аднолькава прыгодныя для вымярэння ў ланцугах пастаяннага і пераменнага току. Няхай імгненныя токі ў катушках прыбора зрушаны па фазе на вугал φ ($i_1 = I_{m1} \sin \omega t$ і $i_2 = I_{m2} \sin (\omega t + \varphi)$), тады імгненны вярчальны момант рухомай катушкі запішацца так: $m_в = k' i_1 i_2$, а сярэдні вярчальны момант за перыяд будзе:

$$M_в = \frac{1}{T}\int_0^T m_в dt = \frac{k'}{T}\int_0^T i_1 i_2 dt = \frac{k'}{T}\int_0^T I_{m1} I_{m2} \sin \omega t \times$$

$$\times \sin(\omega t + \varphi) dt = k_1 I_1 I_2 \cos\varphi ,$$

значыць

$$M_в = k_1 I_1 I_2 \cos\varphi . \qquad (3.2)$$

Пры вярчэнні рухомай катушкі спіральныя спружыны закручваюцца і ствараюць процідзейны момант, прапарцыйны вуглу павароту катушкі $M_{пр} = k_2 \alpha$. Указальная стрэлка прыбора спыніцца, калі $M_{пр} = M_в$. Такім чынам, $k_2 \alpha = k_1 I_1 I_2 \cos\varphi$ або $\alpha = (k_1/k_2) I_1 I_2 \cos\varphi$. Абазначым k_1/k_2 праз k, атрымаем $\alpha = kI_1 I_2 \cos\varphi$, пры $\varphi = 0$ будзем мець

$$\alpha = kI_1 I_2. \qquad (3.3)$$

Такім чынам, вугал адхілення ўказальнай стрэлкі прапарцыйны здабытку токаў у нерухомай і рухомай катушках і $\cos\varphi$. Аналагічную формулу атрымаем пры ўключэнні прыбора ў ланцуг пастаяннага току.

Прыборамі электрадынамічнай сістэмы з'яўляюцца амперметры, вальтметры і ватметры. У амперметрах для вымярэння невялікіх токаў (да 0,5 А) рухомая і нерухомая катушкі злучаюцца паслядоўна. Пры гэтым у абедзвюх катушках будуць аднолькавыя токі ($I_1 = I_2 = I$) і формула (3.3) будзе мець выгляд

$\alpha = kI^2$. Для вымярэння токаў больш 0,5 А нерухомая і рухомая катушкі злучаюцца паралельна. Нерухомая катушка пры гэтым выконвае ролю шунта, а токі ў катушках адваротна прапарцыйныя іх супраціўленням:

$$I_1/I_2 = r_2/r_1 . \tag{3.4}$$

З раўнання (3.4) знаходзім I_1 і падстаўляем яго ў формулу (3.3), у выніку атрымаем $\alpha = k(r_2/r_1) I_2^2$. Абазначым $k(r_2/r_1)$ праз k', атрымаем $\alpha = k' I_2^2$.

Такім чынам, вугал адхілення ўказальнай стрэлкі прапарцыйны квадрату току ў рухомай катушцы, таму шкала ў прыборах будзе нераўнамерная.

У вальтметрах абедзве катушкі злучаюцца паслядоўна. Акрамя гэтага, паслядоўна падключаецца яшчэ дадатковае супраціўленне $r_д$. Значыць, супраціўленне вальтметра выразіцца сумай супраціўленняў: $r = r_1 + r_2 + r_д$, а ток, які праходзіць праз катушкі, вызначаецца паводле закону Ома:

$$I_1 = I_2 = U/r . \tag{3.5}$$

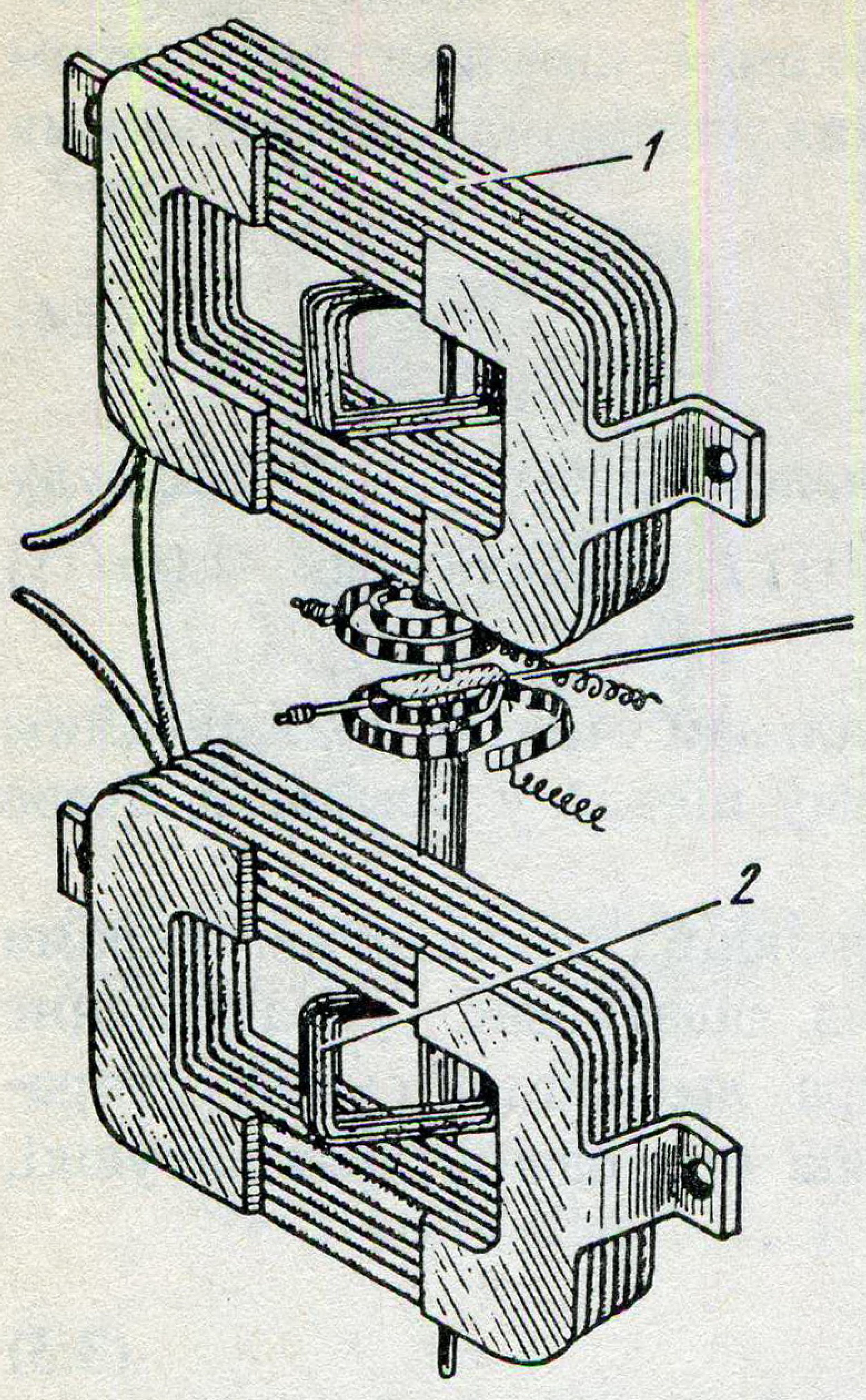
Падставім значэнні I_1 і I_2 з раўнання (3.5) у формулу (3.3), атрымаем $\alpha = k(U^2/r^2)$. Абазначым k/r^2 праз k^1, атрымаем $\alpha = k'U^2$.

Вугал адхілення ўказальнай стрэлкі ў электрадынамічных вальтметрах прапарцыйны квадрату напружання, што абумоўлівае нераўнамернасць шкалы ў гэтых прыборах.

Электрадынамічныя прыборы маюць рад дадатных якасцей: магчымасць прымянення для вымярэнняў велічыняў у ланцугах пастаяннага і пераменнага току; высокую дакладнасць, абумоўленую адсутнасцю ў катушках металічных частак.

Да недахопаў электрадынамічных прыбораў трэба аднесці: нізкую адчувальнасць, бо малыя значэнні токаў у катушках прыбораў не могуць выклікаць прыметнага адхілення рухомай катушкі; уплыў знешняга магнітнага поля на дакладнасць паказання прыбораў; вялікую адчувальнаасць да перагрузкі, бо ток у катушкі падводзіцца праз тонкія спіральныя спружынкі; нераўнамернасць шкалы (акрамя ватметра).

Для ўстаранення ўплыву знешняга магнітнага поля на паказанне электрадынамічныя прыборы робяцца экраніраванымі або астатычнымі. У экраніраваных прыборах абедзве катушкі змяшчаюцца ў жалезны цыліндр *2* (гл. рыс. 3.9). У астатычных прыборах ёсць дзве злучаныя паслядоўна нерухомыя *1* і дзве рухомыя *2*



Рыс. 3.10. Схема астатычнага электрадынамічнага прыбора

катушкі, замацаваныя на вертыкальнай восі (рыс. 3.10). Верхнія рухомая і нерухомая катушкі маюць процілеглую намотку абмотак ў параўнанні з ніжнімі. Адначасовае змяненне напрамкаў токаў у верхніх катушках не змяняе напрамку адхілення катушак, і яны паварочваюць вось у адным кірунку. Знешняе магнітнае поле пранізвае абедзве рухомыя катушкі, стварае роўныя па значэнні і процілеглыя па напрамку вярчальныя моманты, якія кампенсуюць адзін аднаго, у выніку чаго ліквідуецца ўплыў знешняга магнітнага поля.

Для павелічэння адчувальнасці электрадынамічных прыбораў нерухомую катушку насаджваюць на стрыжань з лістоў электратэхнічнай сталі або пермалоя. Такія прыборы называюцца *ферадынамічнымі.* Ферадынамічныя прыборы маюць большы вярчальны момант, чым прыборы электрадынамічнай сістэмы. Яны лепш засцярожаны ад знешніх магнітных палёў. Увядзенне ў нерухомую катушку ферамагнітнага стрыжня прыводзіць да страты энергіі на віхравыя токі і гістэрэзіс, паніжае дакладнасць прыбораў. Ферадынамічныя прыборы робяцца з класамі дакладнасці 1,0 і 1,5. На практыцы яны выкарыстоўваюцца ў якасці самапішучых рэгістрацыйных прыбораў.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Якое ўстройства і прынцып дзеяння электрадынамічных прыбораў?
2. Чаму электрадынамічныя прыборы аднолькава прыгодныя для вымярэння велічыняў у ланцугу як пастаяннага, так і пераменнага току?
3. Як ухіляецца ўплыў знешняга магнітнага поля ў электрадынамічных прыборах?
4. Чым адрозніваюцца ферадынамічныя прыборы ад электрадынамічных?
5. Чаму ў экранiраваных прыборах экран робіцца з жалеза?

3.6. Лічбавыя вымяральныя прыборы

Лічбавыя вымяральныя прыборы ў апошні час сталі шырока прымяняцца ў вучэбных фізічных лабараторыях, у лабараторыях радыётэхнікі і аўтаматыкі, электронікі, у інжынерна-канструктарскіх установах.

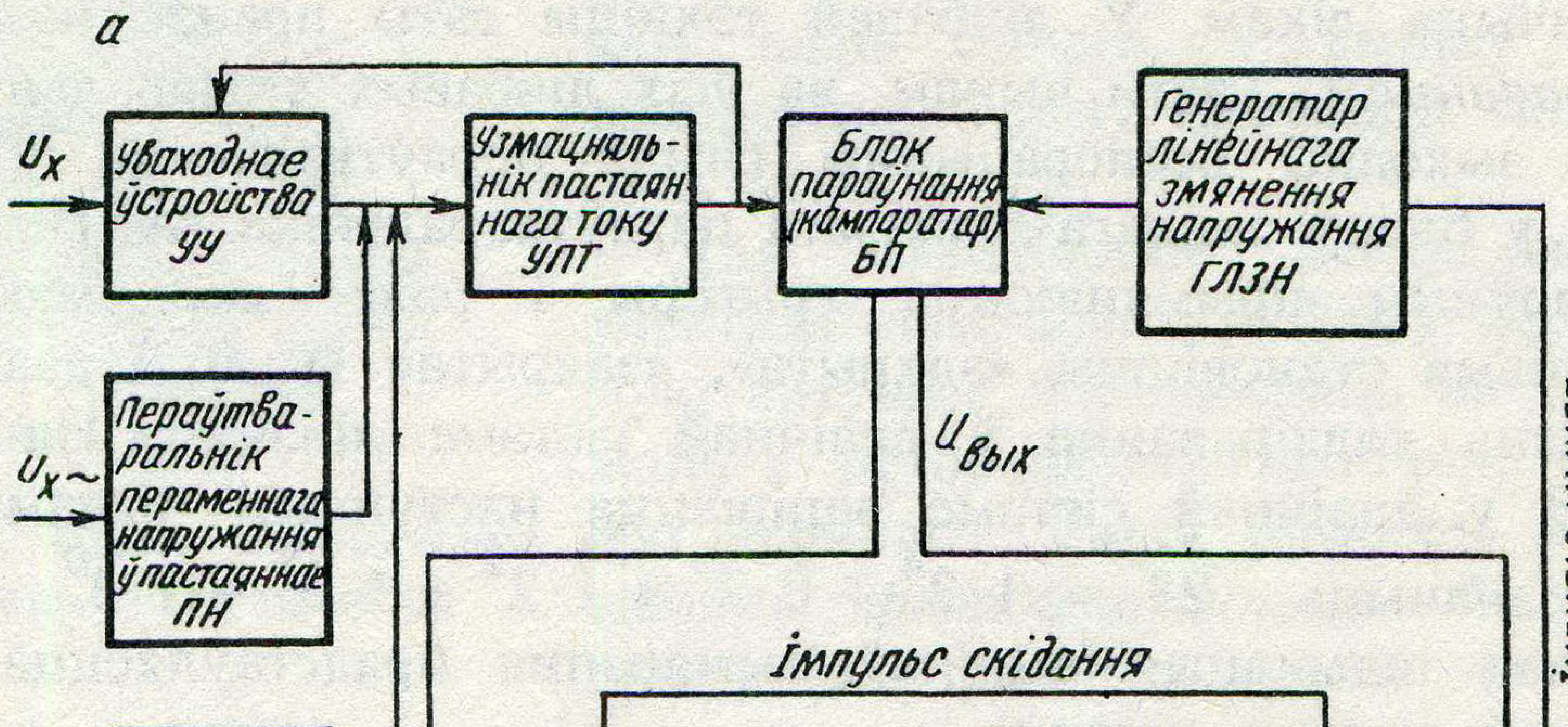
У аналагавых электрамеханічных прыборах успрымаецца бесперапынны сігнал, які змяняецца аналагічна зыходнай інфармацыі аб фізічнай велічыні. У лічбавых вымяральных прыборах бесперапынны сігнал, які адлюстроўвае інфармацыю аб фізічнай велічыні, падаецца ў дыскрэтнай форме. Дыскретны сігнал можна абазначыць лікам. У лічбавай тэхніцы гэты працэс называецца *кадзіраваннем.* Такім чынам, ва ўсіх лічбавых вымяральных прыборах зыходны бесперапынны сігнал пераўтвараецца ў кодавы сігнал у блоку аналага-лічбавага пераўтваральніка (АЛП). У АЛП у асноўным прымяняюцца трыгеры і рэле, якія маюць два ўстойлівыя становішчы «адкрыта», «закрыта» (1, 0) і дазваляюць выканаць кадзіраванне ў двайчнай сістэме лічэння. Напрыклад, лік 23 у двайчнай сістэме запішацца наступным чынам: 10111, гэта значыць $23 = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 10111$. Лічбавая індыкацыя вынікаў вымярэння прадстаўляецца ў дзесятковай сістэме лічэння.

Лічбавыя вымяральныя прыборы маюць рад дадатных якасцей у параўнанні з аналагавымі: зручнасць адліку, рэгістрацыі; адсутнасць суб'ектыўных памылак; высокая дакладнасць; хуткадзеянне; магчымасць дыстанцыйнага вымярэння; спалучэнне з ЭВМ і інш.

Лічбавыя прыборы універсальныя і могуць прымяняцца для вымярэння напружання пастаяннага і пераменнага току, частаты, фазы, супраціўлення рэзістараў, ёмістасці кандэнсатараў і іншых электрычных і неэлектрычных велічыняў. У лічбавых вымяральных прыборах найбольшае распаўсюджанне атрымалі сямісегментавыя люмінесцэнтныя мазаічныя індыкатары — гэта сем лінейных сегментаў, з якіх састаўляюцца лічбы. Сегменты складаюцца з асобных элементаў мазаікі, якія свецяцца пры падключэнні напружання. У якасці лікавых індыкатараў прымяняюцца таксама газаразрадныя лямпы (дэкатроны), якія маюць выгляд шклянога балона, унутры якога знаходзіцца дзесяць шкляных трубачак, выгнутых у выглядзе лічбаў і напоўненых інертным газам. Пры падачы на электроды напружання ў трубках узнікае тлеючы разрад і адпаведныя лічбы свецяцца. Другім відам газаразраднага індыкатара з'яўляюцца лямпы з агульным анодам у выглядзе

сеткі і дзесяццю драцянымі катодамі ў форме лічбаў. Пры падачы напружання паміж анодам і выбранымі катодамі ўзнікае тлеючы разрад, выбраныя катоды свецяцца. Для стварэння лічбаў, літар і графічных сімвалаў прымяняюцца матрычныя індыкатары. Яны маюць індыкатарнае поле, якое складаецца з асобных святлівых кропак. Пры падачы напружання на выбраныя кропкі матрыцы ўзнікае святлівы вобраз літары, графіка, рысунка.

Разгледзім структурную схему лічбавага вальтметра з часава-імпульсным пераўтварэннем (рыс. 3.11). У гэтых прыборах вымернае пастаяннае напружанне U_x падключаецца да ўваходнага ўстройства з высокадакладным дзельнікам. З дзельніка напружанне падаецца на ўзмацняльнік пастаяннага току (УПТ), дзе пераўтвараецца ў сіметрычнае напружанне $+U$ і $-U$, і далей ў блок



Рыс. 3.11. Структурная схема лічбавага вальтметра з часава-імпульсным пераўтваральнікам (*а*), дыяграмы напружанняў для тлумачэння работы вальтметра (*б*)

параўнання. На другі ўваход блока параўнання падаецца ад генератара лінейна паніжаючае напружанне U_k. У момант часу t_1 (кропка A на дыяграме напружання) блок параўнання пасылае імпульс, які адкрывае генератар высокай стабільнай частаты (ІСЧ), і электронны лічыльнік пачынае лік імпульсаў. У наступны момант часу t_2, калі напружанне U_k зраўняецца з U_x (пункт B на дыяграме напружанняў), электронны імпульс блока параўнання спыняе падлік імпульсаў ГСЧ. Пры зваротным ходзе пілападобнага лінейнага напружання генератар імпульсаў высокай стабільнай частаты замыкаецца. У гэты момант вузел скідання пасылае імпульс, які прыводзіць усе блокі лікавага лічэння ў нулявое становішча — цыкл закончыўся. Разгледжаны цыкл змяненняў перыядычна паўтараецца. Для ўстанаўлення нуля прыбора ўваход узмацняльніка пастаяннага току зазямляецца, а пры калібраванні на яго ўваход падаецца напружанне ад крыніцы апорнага напружання (КАН).

Пры лінейным змяненні пілападобнага кампенсацыйнага напружання вымернае напружанне U_x будзе прапарцыйна інтэрвалу часу $\Delta t = t_2 - t_1$, у прамежак якога працаваў электронны лічыльнік: $U_x = k\Delta t$, дзе k — каэфіцыент, які залежыць ад хуткасці падзеяння пілападобнага напружання.

Няхай за час Δt электронны лічыльнік зарэгістраваў n імпульсаў. Паколькі $n = \Delta t / T$ (T — перыяд імпульса высокай стабільнай частаты), то $U_x = Tn$. Велічыню kT можна падабраць такой, каб лік n ў дзесятковай сістэме лічэння адпавядаў значэнню вымеранага напружання і высвечваўся на лікавым індыкатары вальтметра.

Недахопам вальтметраў з часаімпульсным пераўтваральнікам з'яўляецца ўплыў частаты прамысловай сеткі на паказанні прыбора. Для паслаблення гэтай перашкоды робяцца інтэграцыйныя (частотна-імпульсныя) вальтметры, якія вымяраюць сярэднеарыфметычныя значэнні напружання за час, які значна перавышае перыяд частаты прамысловай сеткі. Яны маюць інтэгратар — устройства, выхадное напружанне якога $U_{\text{інт}}$ прапарцыйна інтэгралу па часе ад уваходнага напружання. Гэтае напружанне падаецца ў блок параўнання, значыць, $U_{\text{інт}} = k \int_0^{\tau} U_{\text{ув}}(t)\, dt$, дзе k — пастаянная інтэгравання.

У лічбавых вальтметрах пераменнага напружання маецца пераўтваральнік пераменнага напружання ў пастаяннае. Ён з'яўляецца пераўтваральнікам сярэдневыпрамленых значэнняў пераменнага напружання з фільтрам і ўзмацняльнікам, які праградуяваны па сярэднеквадратычным значэнні сінусоіднага напру-

жання. Пераўтваральнік пераменнага напружання складаецца з пераўтваральніка імпеданса, двухпаўперыяднага дэтэктара і двух фільтраў нізкай частаты. Выхадное пастаяннае напружанне паступае ва ўзмацняльнік пастаяннага току УПТ, а потым на ўваход аналага-лічбавага пераўтваральніка АЛП.

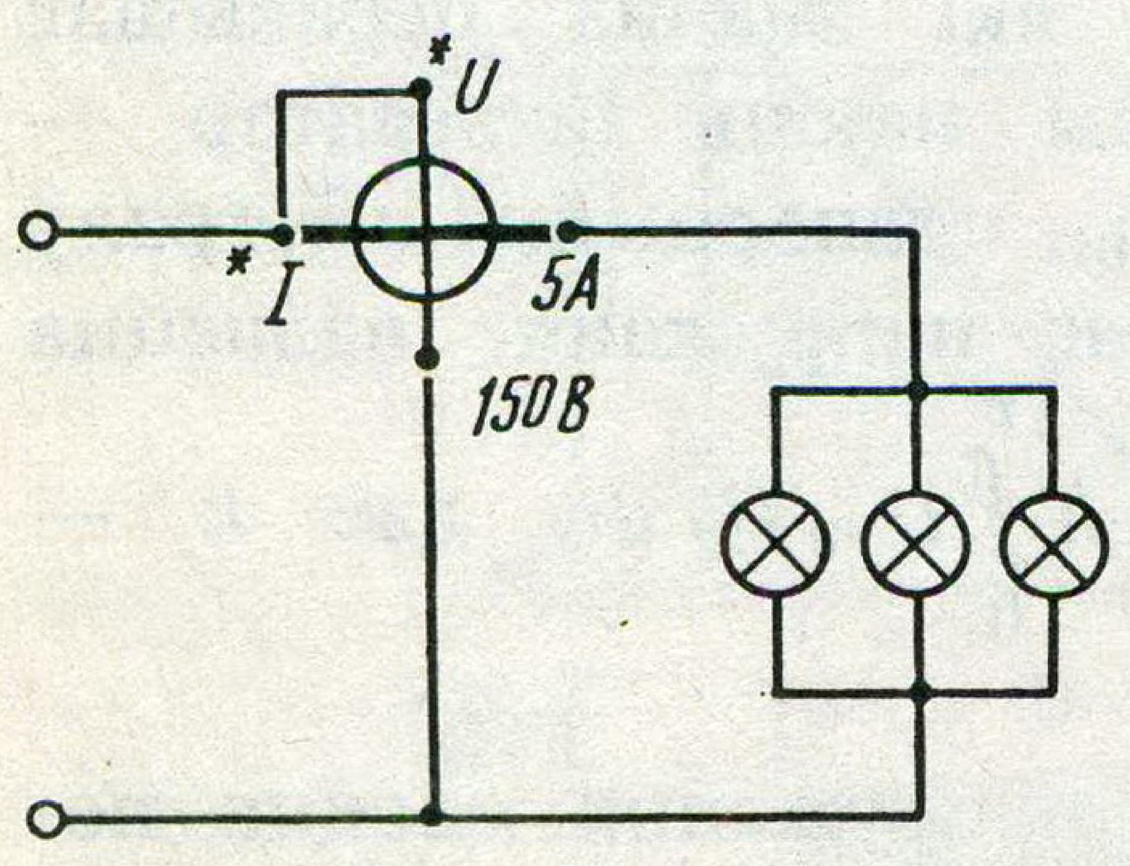
Для вымярэння пастаяннага току ў АЛП маецца пераўтваральнік пастаяннага току ў пастаяннае напружанне. Вымерны ток праходзіць па рэзістары r і ствараe на ім падзенне напружання, якое ўзмацняецца і падаецца на ўваход АЛП.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. На якім прынцыпе заснавана работа лічбавых прыбораў?
2. У якой сістэме лічэння выконваецца кадзіраванне вымернай велічыні?
3. Як выконваецца кадзіраванне вымернай бесперапыннай велічыні ў АЛП?
4. Якое прызначэнне ў лічбавых прыборах кампаратара? Генератара высокай стабільнай частаты ГСЧ? Электроннага лічыльніка? Дэшыфратара?
5. Як ажыццяўляецца лікавая індыкацыя вымернай велічыні?
6. Назавіце станоўчыя якасці і недахопы частотна-імпульсных лічбавых вымяральных прыбораў.
7. На якім прынцыпе грунтуецца работа інтэгравальных частотна-імпульсных лічбавых прыбораў?

3.7. Ватметры

Аднафазны электрадынамічны в а т м е т р а к т ы ў н а й м а г у т н а с ц і складаецца з рухомай і нерухомай катушак. Нерухомая катушка мае невялікую колькасць віткоў тоўстага проваду, з'яўляецца токавай і ўключаецца ў ланцуг паслядоўна з нагрузкай, а рухомая мае вялікую колькасць віткоў тонкага проваду, з'яўляецца катушкай напружання і ўключаецца ў ланцуг паралельна нагрузцы (рыс. 3.12). Паколькі напрамак адхілення ўказальнай стрэлкі ватметра залежыць ад узаемнага напрамку токаў ў катушках, то клемы пачатку нерухомай і рухомай катушак абазначаюцца $^*I$ і $^*U$ і падключаюцца да крыніцы току, а клемы канцоў нерухомай (5 А)



Рыс. 3.12. Схема ўключэння аднафазнага ватметра ў ланцуг

і рухомай (150 V) катушак падключаюцца да нагрузкі. У іншых ватметрах граніцы току і напружання могуць быць іншымі. Клемы $*I$ і $*U$ падключаюцца да аднаго і таго ж проваду, і іх можна злучыць паміж сабою праваднікам, што і робіцца на практыцы пры вымярэнні актыўнай магутнасці. У ватметрах актыўнай магутнасці паслядоўна рухомай катушцы ўключаецца высакаомны рэзістар, пры гэтым рухомую катушку можна лічыць актыўным супраціўленнем. Пры ўключэнні ватметра ў ланцуг з актыўна-індуктыўнай нагрузкай будзем мець

$$u_2 = U_m \sin \omega t; \; i_1 = I_{m1} \sin (\omega t - \varphi); \; i_2 = I_{m2} \sin \omega t,$$

дзе i_1 — ток у нерухомай катушцы; i_2 — ток у рухомай катушцы.

Імгненнае значэнне вярчальнага моманту пры ўзаемадзеянні катушак будзе прапарцыйна здабытку імгненных токаў: $m_в = k' i_1 i_2$. Імгненны ток у рухомай катушцы прапарцыйны імгненнаму значэнню напружання. Такім чынам,

$$m_в = k_1 i_1 u_2 . \tag{3.6}$$

Падставім у формулу (3.6) замест i_1 і u_2 іх значэнні, атрымаем

$$m_в = k_1 I_m U_m \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) .$$

Сярэдні вярчальны момант за перыяд

$$M_в = \frac{1}{T}\int_0^T m_в dt = \frac{1}{T}\int_0^T k_1 \, I_m U_m \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi)\, dt =$$

$$= k_1 IU \cos \varphi = k_1 P .$$

Такім чынам, вярчальны момант рухомай катушкі (рухомай часткі вымяральнага механізму) ватметра прапарцыйны актыўнай магутнасці ланцуга. Процідзейны момант прапарцыйны вуглу павароту рухомай катушкі $M_{пр} = k_2 \alpha$.

Указальная стрэлка ватметра будзе знаходзіцца ў стане раўнавагі, калі вярчальны і процідзейны моманты акажуцца роўнымі па значэнні: $M_{пр} = M_в$. Значыць, $k_2\alpha = k_1 P$ або $\alpha = \left(\frac{k_1}{k_2}\right) P = kP$. Такім чынам, у электрадынамічных ватметрах вугал адхілення ўказальнай стрэлкі прапарцыйны магутнасці, што і абумоўлівае раўнамернасць шкалы прыбора.

У ватметрах рэактыўнай магутнасці паслядоўна з рухомай катушкай падключаецца

індуктыўнае супраціўленне. Пры гэтым $x_L >> r_к$($r_к$ — актыўнае супраціўленне катушкі), што стварае зрух фаз паміж токам і напружаннем у галіне рухомай катушкі 90° ($u_2 = U_m \sin \omega t$; $i_2 = I_{m2} \sin (\omega t - 90°)$).

Пры ўключэнні ватметра ў ланцуг з актыўна-індуктыўнай нагрузкай ток у нерухомай катушцы $i_1 = I_{m1} \sin (\omega t - \varphi)$, а імгненны вярчальны момант узаемадзеяння катушак будзе прапарцыйны здабытку імгненных токаў у іх:

$$m_в = k' i_1 i_2 . \tag{3.7}$$

Ток у рухомай катушцы i_2 прапарцыйны імгненнаму напружанню і адстае па фазе ад яго на 90°, значыць, $i_2 = k'' U_m \sin (\omega t - 90°)$. Падставім у формулу (3.7) значэнні i_1 і i_2, атрымаем

$$m_в = k' k'' I_m U_m \sin (\omega t - \varphi) \sin (\omega t - 90°) =$$

$$= k_1 IU (\sin \varphi - \sin 2 \omega t \cos \varphi + \cos 2\omega t \sin \varphi) .$$

Сярэдняе значэнне вярчальнага моманту за перыяд

$$M_в = \frac{1}{T} \int_0^T m_в dt = k_1 IU \sin \varphi = k_1 Q .$$

Процідзейны момант прапарцыйны вуглу павароту рухомай катушкі $M_{пр} = k_2 \alpha$. Указальная стрэлка ватметра будзе знаходзіцца ў стане раўнавагі, калі вярчальны і процідзейны моманты акажуцца роўнымі па значэнні:

$$M_{пр} = M_в; \; k_2 \alpha = k_1 Q \text{ або } \alpha = (k_1 / k_2) Q = kQ .$$

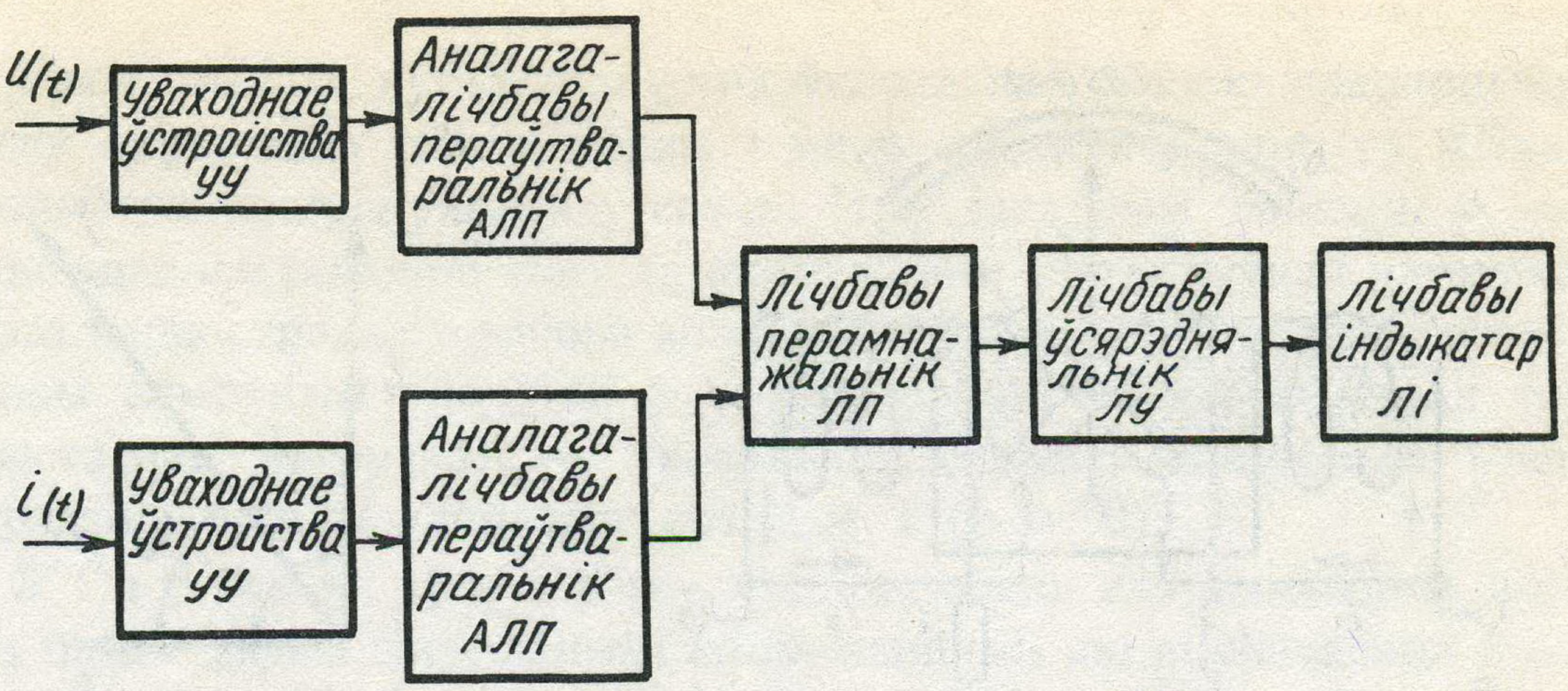
Такім чынам, у ватметры вугал адхілення ўказальнай стрэлкі прапарцыйны рэактыўнай магутнасці ланцуга пераменнага току і шкала ў прыборы раўнамерная.

Лічбавы ватметр робіцца па схеме пераўтварэння $u(t)$ і $i(t)$ ў дыскрэтныя значэнні гэтых велічыняў, якія прадстаўляюцца лічбавымі кодамі (рыс. 3.13).

У ватметрах выкарыстоўваюцца АЛП двухкратнага інтэгравання. Лічбавыя ватметры маюць высокае хуткадзеянне.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Устройства і прынцып дзеяння электрадынамічнага ватметра актыўнай магутнасці. Ватметра рэактыўнай магутнасці.



Рыс. 3.13. Структурная схема лічбавага ватметра

2. Чаму ў ватметры адзначаюцца клемы пачатку токавай катушкі і катушкі напружання?

3. Як уключаюцца ватметры ў ланцуг?

4. Чаму ў ватметрах раўнамерная шкала?

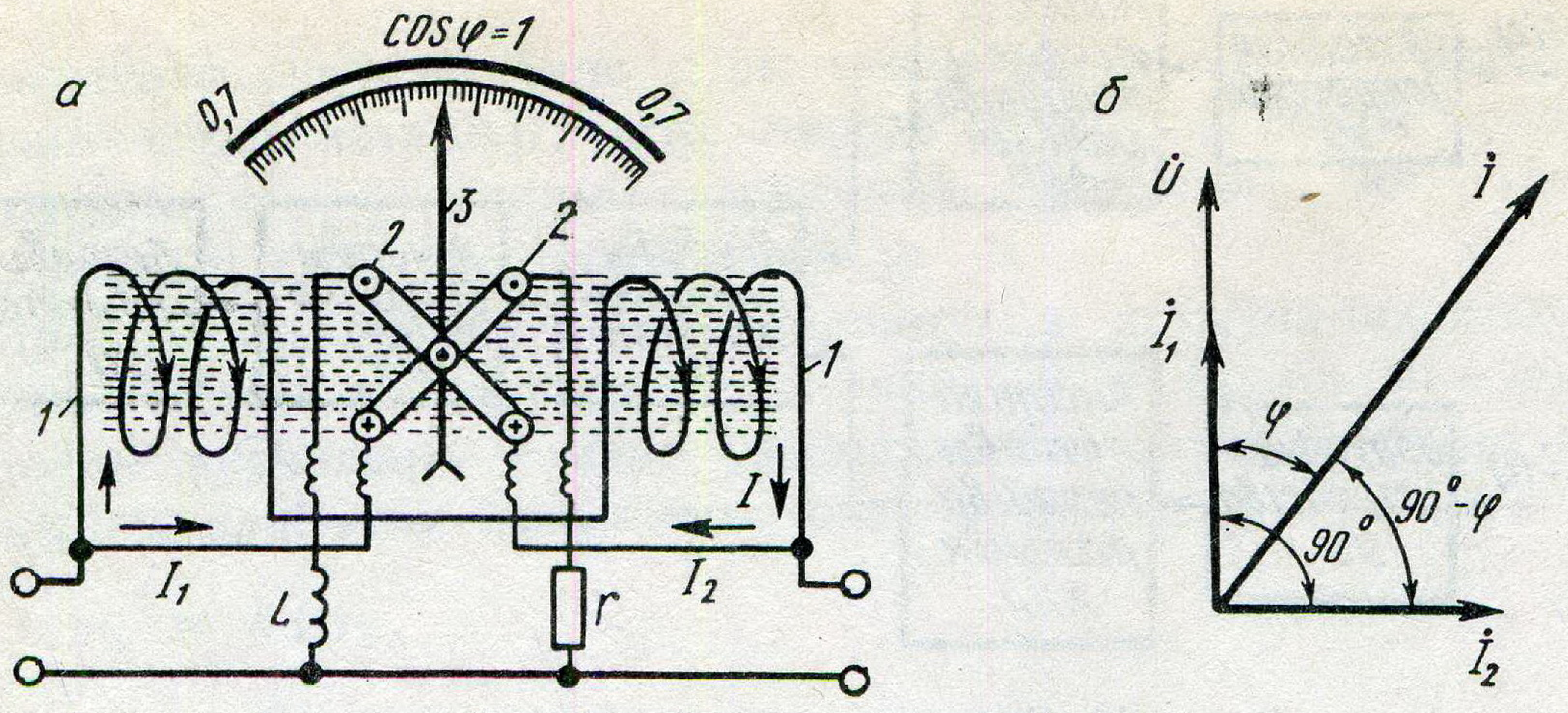
5. Ці на аднолькавы лік дзяленняў шкалы адхіляцца стрэлкі двух ватметраў, уключаных у ланцуг, калі да першага ватметра паслядоўна падключылі рэзістар 5 кОм? Унутранае супраціўленне ватметраў 5 кОм.

Адказ: $n_2 = 2n_1$.

3.8. Фазометр

Фазометры служаць для вымярэння рознасці (зруху) фаз паміж токам і напружаннем. Фазометры бываюць электрамагнітнай і электрадынамічнай сістэм. Электрадынамічны фазометр (рыс. 3.14, *а*) мае нерухомую катушку *1*, якая складаецца з двух частак, і дзве рухомыя катушкі *2*, размешчаныя пад вуглом 90° адна да другой, што ўяўляе сабою электрадынамічны лагометр.

Лагометрамі называюцца электравымяральныя прыборы, у якіх няма механічнага процідзейнага моманту і паказанні залежаць не ад значэння току, а ад стасунку токаў. У лагометрах рухомай часткай з'яўляюцца дзве змацаваныя пад вуглом 90° катушкі. Токі ў катушках ствараюць два процілегла накіраваныя вярчальныя моманты, якія ўраўнаважваюць адзін аднаго пры некаторым вугле адхілення рухомай сістэмы прыбора. Рухомыя катушкі замацаваны на восі, на восі таксама замацавана і ўказальная стрэлка *3*. Нерухомая катушка зроблена з тоўстага праваду і ўключаецца ў ланцуг паслядоўна з нагрузкай, а рухомая катушка — з тонкага праваду і ўключаецца паралельна нагрузцы. Паслядоўна з адной



Рыс. 3.14. Фазометр электрадынамічнай сістэмы:
а — схема; *б* — вектарная дыяграма току і напружання

рухомай катушкай уключаецца актыўнае супраціўленне *r*, якое забяспечвае роўнасць фаз паміж токам і напружаннем у ёй. Паслядоўна з другой катушкай уключаецца катушка індуктыўнасці *L*, што стварае зрух фаз на 90° паміж токам і напружаннем у ёй (рыс. 3.14, *б*).

Размяшчэнне рухомых катушак пад вуглом 90° адна да адной стварае процілеглыя вярчальныя моманты катушак. Вярчальныя моманты першай і другой рухомых катушак на аснове раўнання (3.2) можна запісаць у выглядзе формул:

$$M_1 = k_1 I_1 I \cos\varphi \sin\alpha ;$$

$$M_2 = k_2 I_2 I \cos(90° - \varphi) \sin(90° - \alpha) = k_2 I_2 I \sin\varphi \cos\alpha ,$$

дзе I — ток у нерухомай катушцы; I_1 і I_2 — токі ў рухомых катушках; α — вугал паміж нармалямі да плоскасцяў нерухомай і адной рухомай катушак; φ — вугал зруху фаз паміж токамі ў нерухомай і першай рухомай катушцы з актыўным супраціўленнем, гэта значыць паміж токам і напружаннем ланцуга.

Указальная стрэлка прыбора спыніцца ў стане раўнавагі, калі абодва вярчальныя моманты будуць роўныя па значэнні:

$$M_1 = M_2 \text{ або } k_1 I_1 I \cos\varphi \sin\alpha = k_2 I_2 I \sin\varphi \cos\alpha . \qquad (3.8)$$

З раўнання (3.8) атрымаем

$$\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{k_2 I_2 I}{k_1 I_1 I} \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} \text{ або } \operatorname{tg}\alpha = k \operatorname{tg}\varphi .$$

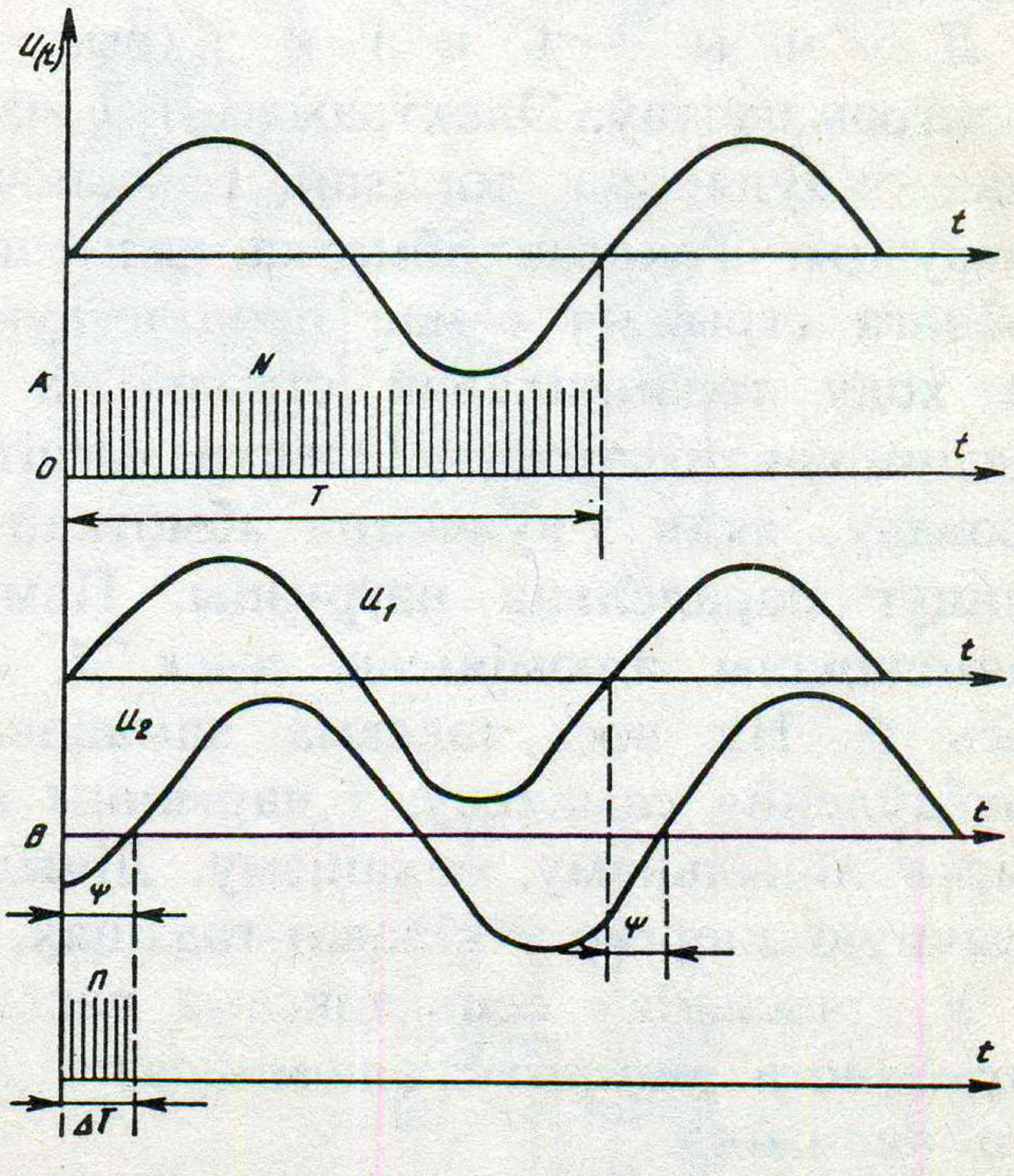
Такім чынам, вугал адхілення ўказальнай стрэлкі прапарцыйны вуглу зруху фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу. Шкала фазометра праградуявана ў $\cos\varphi$. Пры дадатным значэнні φ, што адпавядае адставанню току ад напружання (індуктыўная нагрузка), указальная стрэлка прыбора адхіляецца ўправа ад сярэдзіны шкалы, а пры адмоўным значэнні φ — адставанне напружання ад току (ёмістасная нагрузка) — указальная стрэлка адхіляецца ўлева. Сярэдзіна шкалы адпавядае $\cos\varphi = 1$ ($\varphi = 0$).

Лічбавы фазометр служыць для вымярэння зруху фаз паміж двума сінусоіднымі напружаннямі, які вызначаецца вымярэннем перыядаў сінусоідных напружанняў U_1 і U_2.

Працяг часу аднаго перыяду вызначае адрэзак часу адкрытага стану селектара, на працягу якога праз селектар на электронны лічыльнік будуць праходзіць імпульсы дакладнай высокай частаты f_0 з перыядам T_0. Лік імпульсаў N за перыяд T роўны: $N = T/T_0$, што адпавядае становішчу A на дыяграме (рыс. 3.15).

Калі напружанні U_1 і U_2 зрушаны па фазе, то імпульсы перыяду аднаго напружання акажуцца зрушанымі адносна імпульсаў перыяду другога напружання па часе на ΔT прапарцыйна зруху па фазе ψ (становішча B на дыяграме). Лік імпульсаў дакладнай высокай частаты за час ΔT роўны $n = \Delta T/T_0$, а $n/N = \Delta T/T$.

Паколькі $\psi = \omega\Delta T$, а $\omega = 2\pi/T$, то атрымаем $\psi = 360\ \Delta T/T$ або $\psi = 360\, n/N = 360\,(f/f_0)n$.



Рыс. 3.15. Графікі для тлумачэння работы лічбавага фазометра

Фазометры, дзеянне якіх заснавана на гэтым прынцыпе, прымяняюцца для вымярэння зруху фаз нізкачастотных пераменных напружанняў, у якіх $f_0/f \geq 10^3$. На практыцы для вымярэння зруху фаз у высокачастотных ваганнях напружання прымяняюцца інтэгравальныя фазометры.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Апішыце ўстройства электрадынамічных фазометраў.

2. Як уключаецца фазометр у ланцуг пераменнага току?

3. Чаму ў фазометры паслядоўна з адной рухомай катушкай уключаецца актыўнае супраціўленне, а паслядоўна з другой — індуктыўнае?

4. Як робіцца градуяванне шкалы фазометра?

5. Як вымяраецца зрух фаз паміж двума сінусоіднымі напружаннямі лічбавым фазометрам?

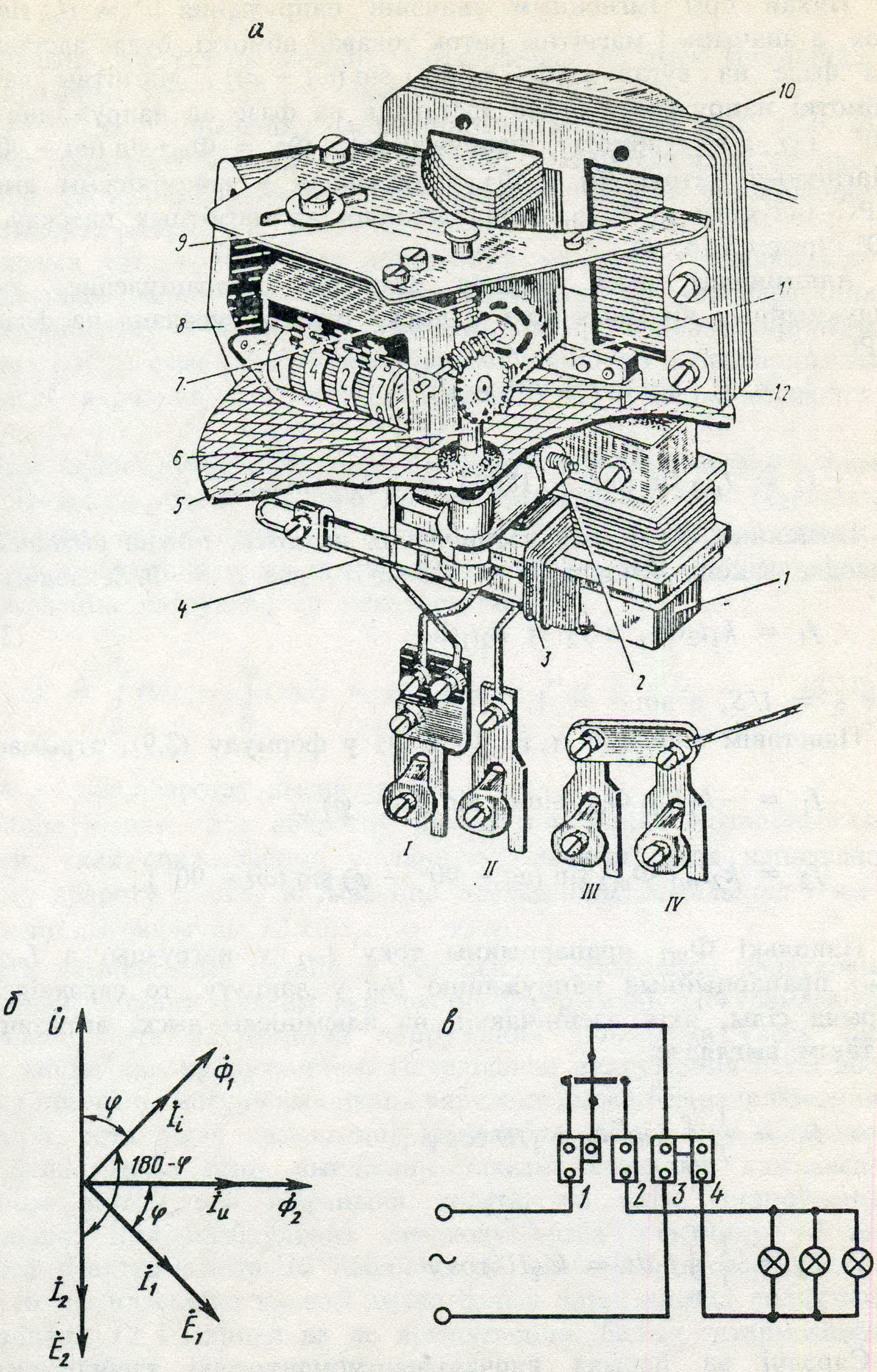
3.9. Індукцыйныя прыборы

З індукцыйных прыбораў шырокае прымяненне ў практыцы атрымаў лічыльнік электрычнай энергіі пераменнага току прамысловай частаты.

Лічыльнік (рыс. 3.16, а) складаецца з двух электрамагнітаў. Электрамагніт *1* мае абмотку з тоўстага проваду, якая з'яўляецца токавай і ўключаецца ў ланцуг паслядоўна нагрузцы. Токавая абмотка размешчана на двух полюсах U-падобнага стрыжня і мае процілеглую намотку, на адным полюсе па ходу гадзіннікавай стрэлкі, а на другім — супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі. Электрамагніт *10* мае абмотку *9* з тонкага проваду, якая з'яўляецца абмоткай напружання і ўключаецца ў ланцуг паралельна нагрузцы. Паміж полюсамі электрамагнітаў размешчаны алюмініевы дыск *5,* насаджаны на вертыкальную вось *6.* На восі таксама замацавана жалезная пласцінка для пазбаўлення самаходу, і чарвячны вінт *7* для перадачы вярчэння дыска лічыльнаму механізму. Лічыльны механізм паказвае электрычную энергію ў кілават-гадзінах, якая прайшла праз лічыльнік.

У лічыльніку ёсць таксама пастаянны магніт *8* для стварэння тармазнога моманту алюмініевага дыска і рэгулявання хуткасці яго вярчэння.

Пры ўключэнні лічыльніка ў ланцуг пераменнага току па токавай абмотцы і абмотцы напружання будзе праходзіць пераменны ток. У токавай абмотцы ён стварае магнітны паток Φ_1, а ў абмотцы напружання — магнітны паток Φ_2. Пераменныя магнітныя патокі Φ_1 і Φ_2 узбуджаюць у алюмініевым дыску індукцыйныя віхравыя токі i_1 і i_2. Узаемадзеянне магнітнага патоку Φ_1 з токам i_2 і магнітнага патоку Φ_2 з токам i_1 стварае вярчальны момант алюмініевага дыска.



Рыс. 3.16. **Аднафазны індукцыйны лічыльнік СО-2М:**
а — **схема;** *б* — **вектарная дыяграма;** *в* — **схема ўключэння лічыльніка ў ланцуг**

Няхай пры імгненным значэнні напружання $u = U_m \sin \omega t$ ток, а значыць і магнітны паток токавай абмоткі, будзе адставаць па фазе на вугал φ $(\Phi_1 = \Phi_{m1} \sin (\omega t - \varphi))$. Магнітны паток абмоткі напружання будзе адставаць па фазе ад напружання на 90° ($x_L >> r$ абмоткі напружання): $\Phi_2 = \Phi_{m2} \sin (\omega t - 90°)$. Магнітныя патокі Φ_1 і Φ_2 узбуджаюць у алюмініевым дыску ЭРС індукцыі e_1 і e_2, якія адстаюць ад магнітных патокаў на 90° (рыс. 3.16, *б*).

Алюмініевы дыск уяўляе актыўнае супраціўленне, таму індукцыйныя віхравыя токі ў дыску будуць супадаць па фазе з ЭРС:

$$i_1 = I_{m1} \sin (\omega t - 90° - \varphi),$$

а

$$i_2 = I_{m2} \sin (\omega t - 180°) = -I_{m2} \sin \omega t .$$

Імгненныя сілы, якія дзейнічаюць на дыск, можна вызначыць паводле закону Ампера: $F = BlI \sin \alpha$, дзе $B = \Phi / S$, значыць,

$$f_1 = k_1 i_2 \Phi_1, \text{ а } f_2 = k_2 i_1 \Phi_2 , \tag{3.9}$$

дзе $k = l/S$, а $\sin \alpha = 1$.

Падставім значэнні i_1, i_2, Φ_1 і Φ_2 у формулу (3.9), атрымаем:

$$f_1 = -k_1 I_{m2} \Phi_{m1} \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) ;$$

$$f_2 = k_2 I_{m1} \Phi_{m2} \sin (\omega t - 90° - \varphi) \sin (\omega t - 90°) .$$

Паколькі Φ_{m1} прапарцыйны току I_{m1} у нагрузцы, а I_{m2} і Φ_{m2} прапарцыйныя напружанню U_m у ланцугу, то сярэднія за перыяд сілы, якія дзейнічаюць на алюмініевы дыск, выразяцца ў такім выглядзе:

$$F_1 = \frac{1}{T} \int_0^T f_1 dt = k'_1 IU \cos \varphi ;$$

$$F_2 = \frac{1}{T} \int_0^T f_2 dt = k'_2 IU \cos \varphi .$$

Сярэдні за перыяд вярчальны момант, які дзейнічае на алюмініевы дыск:

$$M_в = (F_1 + F_2) r = (k'_1 + k'_2) rIU \cos \varphi = k_3 P .$$

дзе $k_3 = (k'_1 + k'_2)r$.

Значыць, вярчальны момант, які дзейнічае на дыск лічыльніка, прапарцыйны магутнасці ў ланцугу.

Наяўнасць у лічыльніку пастаяннага магніта *8* (гл. рыс. 3.16, *а*) стварае тармазны момант пры вярчэнні алюмініевага дыска аналагічна тармазному моманту алюмініевага каркаса ў прыборах магнітаэлектрычнай сістэмы.

Акрамя гэтага асноўнага тармазнога моманту, у лічыльніку дзейнічаюць яшчэ два тармазныя моманты ад узаемадзеяння электрамагнітаў са сваімі індукцыйнымі токамі. Выніковы тармазны момант роўны суме ўсіх трох тармазных момантаў і прапарцыйны хуткасці вярчэння алюмініевага дыска: $M_т = kv = k2\pi Rn = k_2 n$.

Пры пэўнай хуткасці тармазны момант ураўнаважвае вярчальны момант дыска $M_т = M_в$, або $k_1 P = k_2 n$, адсюль $P = (k_2/k_1)n$. Абазначым k_2/k_1 праз C, атрымаем $P = Cn$. Такім чынам, хуткасць вярчэння дыска прапарцыйная магутнасці. Энергія, якая спажываецца нагрузкай за некаторы час t,

$$W = \int_0^t P dt = \int_0^t C n dt = C \int_0^t n dt = Cnt = CN, \qquad (3.10)$$

дзе N — лік абаротаў дыска за час t.

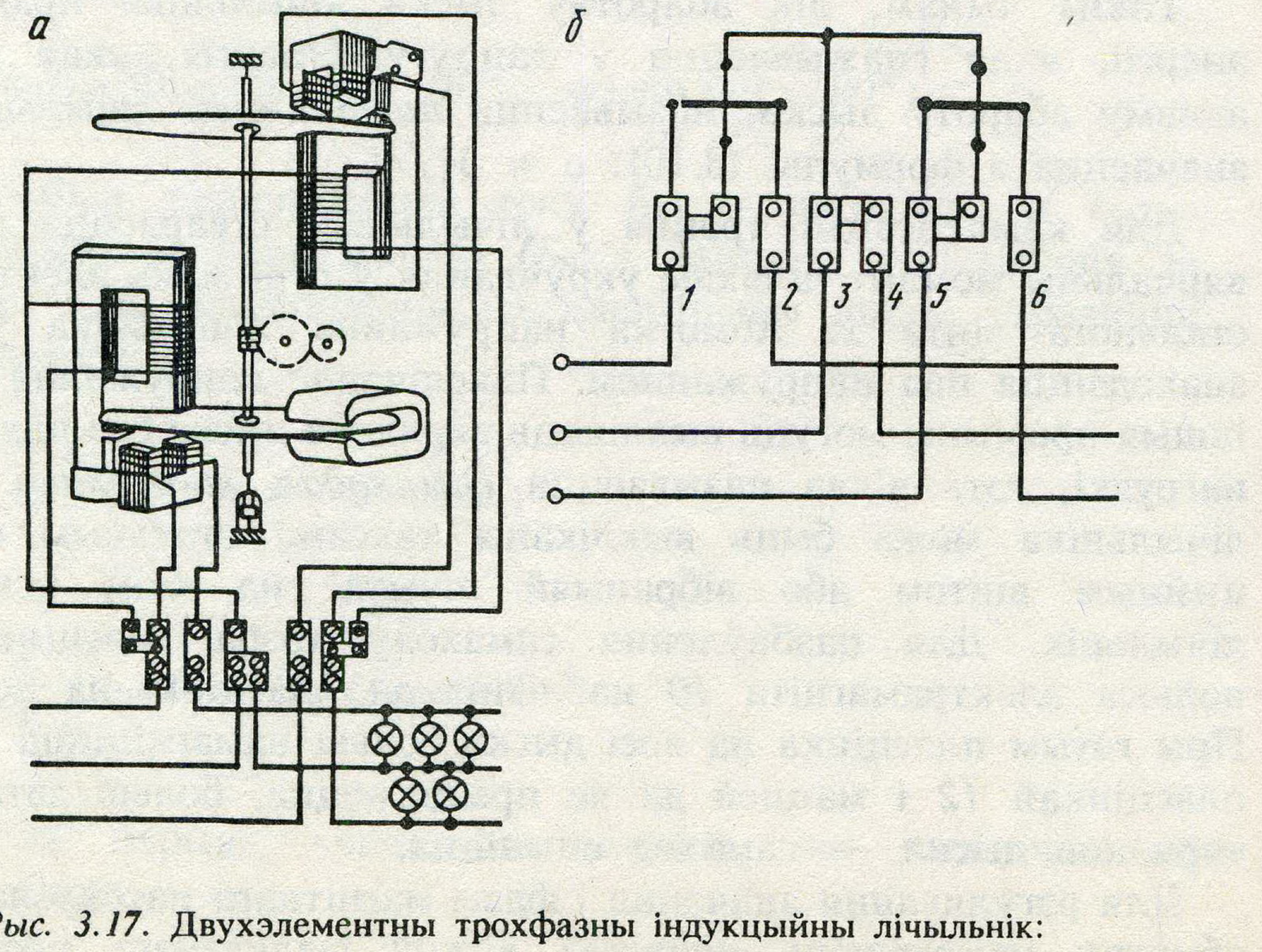
Такім чынам, лік абаротаў дыска лічыльніка прапарцыйны энергіі, якая спажываецца у ланцугу. Энергія, якая адпавядае аднаму абароту дыска, называецца *пастаяннай лічыльніка* і вызначаецца з формулы (3.10): $c = W/N$.

Для кампенсацыі трэння ў лічыльніку ствараецца дадатковы вярчальны момант шляхам укручвання ў стрыжань электрамагніта стальнога вінта *2*. Абмотка напружання лічыльніка ўвесь час знаходзіцца пад напружаннем. Павелічэнне напружання сеткі або іншыя прычыны могуць выклікаць вярчэнне дыска без падключэння нагрузкі, гэта з'ява называецца *самаходам лічыльніка.* Самаход лічыльніка можа быць выклікань таксама стальным кампенсацыйным вінтом або вібрацыяй шчыта, на якім устаноўлены лічыльнік. Для пазбаўлення самаходу трэба пласцінку *12* ад полюса электрамагніта *10* наблізіць да пласцінкі на восі дыска. Пры гэтым пласцінка на восі дыска больш намагніціцца полюснай пласцінкай *12* і мацней да яе прыцягнецца, больш затармозіцца вярчэнне дыска — самаход спыніцца.

Для рэгулявання значэння і фазы магнітнага патоку на токавую абмотку намотваюць некалькі віткоў ізаляванага праваду *3* і злучаюць іх з дротам у выглядзе пятлі *4* з вялікім удзельным

супраціўленнем. Пры перамяшчэнні паўзунка на пятлі змяняюцца супраціўленне пятлі і ток, размагнічваючы электрамагніт *1*. Магнітны паток абмоткі напружання рэгулюецца змяненнем становішча меднай пласцінкі *11* у магнітным шунце.

Схема ўключэння аднафазнага лічыльніка ў сетку паказана на рыс. 3.16, *а*. Пры ўключэнні аднафазнага лічыльніка ў сетку першая і трэцяя клемы падключаюцца да крыніцы току і называюцца *генератарнымі*, а другая і чацвёртая падключаюцца да нагрузкі і называюцца *нагрузачнымі*. Для вымярэння энергіі ў ланцугу трохфазнага току прымяняюцца трохфазныя лічыльнікі індукцыйнай сістэмы з двума і трыма элементамі. Двухэлементны трохфазны лічыльнік складаецца з дзвюх пар электрамагнітаў і двух алюмініевых дыскаў, якія размешчаны на адной восі вертыкальна адзін над адным (рыс. 3.17, *а*). Двухэлементны лічыльнік уключаецца ў трохправадную трохфазную сетку, а трохэлементны — у чатырохправадную. У трохфазных лічыльніках генератарнымі клемамі з'яўляюцца *1*, *3* і *5*, а нагрузачнымі — *2*, *4* і *6* (рыс. 3.17, *б*). На пярэднім баку лічыльніка ўказваецца лік абаротаў дыска, які адпавядае 1 кВт·гадз. электраэнергіі: напрыклад, 1 кВт·гадз. — 1 250 абаротаў дыска. Па гэтых значэннях велічынь можна вызначыць пастаянную лічыльніка $C_н = W_н / N$, якая называецца ***намінальнай пастаяннай лічыльніка.***



Рыс. 3.17. Двухэлементны трохфазны індукцыйны лічыльнік:
а — схема; *б* — уключэнне лічыльніка ў трохправадны трохфазны ланцуг

Сапраўды, пры данай колькасці энергіі, якая прайшла праз лічыльнік, дыск можа зрабіць іншую колькасць абаротаў, тады пастаянная $C_c = W_c/N$ называецца *сапраўднай пастаяннай лічыльніка.*

Адносная хібнасць лічыльніка (%)

$$\beta = \frac{W_н - W_с}{W_н} 100 = \frac{C_н - C_с}{C_н} 100 .$$

Індукцыйныя лічыльнікі маюць невысокі клас дакладнасці з хібнасцямі 1,0; 2,0; 2,5 і нізкую адчувальнасць. Індукцыйныя прыборы могуць прымяняцца ў якасці амперметраў і вальтметраў. Аднак шырокага прымянення яны не атрымалі з-за шэрагу недахопаў (нізкая адчувальнасць, малая дакладнасць, залежнасць паказанняў прыбора ад частаты току, награванне дыска віхравымі токамі, груваcткасць канструкцыі і нязручнасць у абыходжанні).

Да дадатных якасцей прыбораў гэтай сістэмы можна аднесці: вялікі вярчальны момант, малую адчувальнасць да знешняга магнітнага поля, устойлівасць да перагрузак.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зроблены аднафазны і трохфазны індукцыйныя лічыльнікі?
2. Як ствараецца вярчальны момант у індукцыйным лічыльніку?
3. Як паказаць, што вярчальны момант алюмініевага дыску лічыльніка прапарцыйны актыўнай магутнасці ланцуга?
4. Для чаго служыць пастаянны магніт у індукцыйным лічыльніку?
5. Што такое самаход лічыльніка і як ён устараняецца?
6. Як праверыць лічыльнік на самаход?
7. Што такое намінальная пастаянная лічыльніка? Сапраўдная пастаянная лічыльніка? Як іх вызначыць?
8. Як вызначыць адносную хібнасць лічыльніка?
9. Як уключаецца аднафазны лічыльнік у ланцуг? Трохфазны лічыльнік у трохправадны трохфазны ланцуг?
10. Як з дапамогаю пастаяннага магніта сапраўдную пастаянную лічыльніка прывесці ў адпаведнасць з яго намінальнай пастаяннай, калі сапраўдная пастаянная лічыльніка больш намінальнай? Менш намінальнай?
11. Чаму роўная намінальная пастаянная лічыльніка, у якога ўказана 1 кВт·гадз. — 2 500 абаротаў дыска?

А д к а з: $C_н = 1\,440 \frac{Вт \cdot с}{аб}$.

12. Кватэрны лічыльнік паказаў месячны (30 дзён) расход энергіі $W = 120$ кВт·гадз. Вызначце сярэднюю магутнасць і сілу току, калі напружанне сеткі $U = 220$ В, а лямпы гарэлі ў сярэднім па $t = 5$ гадз. у суткі.

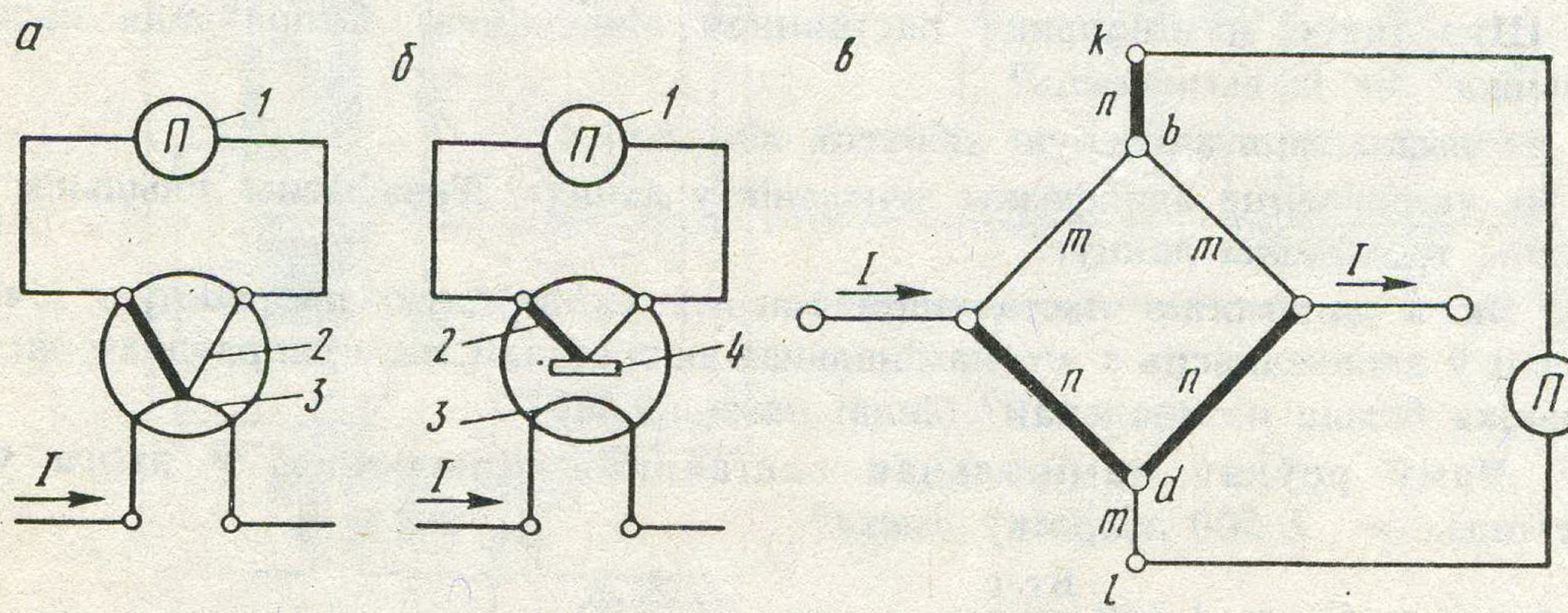
А д к а з: $P = 800$ Вт; $I = 3{,}64$ А.

3.10. Тэрмаэлектрычныя і дэтэктарныя прыборы

Тэрмаэлектрычным прыборам называецца электрычны прыбор магнітаэлектрычнай сістэмы з тэрмапераўтваральнікам. Тэрмаэлектрычныя прыборы бываюць з кантактнымі і бескантактнымі пераўтваральнікамі і з пераўтваральнікамі без награвальніка.

Тэрмаэлектрычны прыбор з кантактным пераўтваральнікам (рыс. 3.18, *а*) складаецца з магнітаэлектрычнага прыбора *1*, тэрмапары *2* і награвальнага элемента *3*. Тэрмапара спаем прыварваецца да токаправоднай ніці (награвальніка), а яе свабодны канец падключаецца да вымяральнага прыбора. Ток праходзіць па награвальніку і награвае спай тэрмапары. Рознасць тэмператур паміж спаем і другімі канцамі тэрмапары абумоўлівае паяўленне тэрмаэлектрарухаючай сілы і тэрматоку ў вымяральным прыборы. Тэмпература спаю тэрмапары прапарцыйна квадрату току. Значыць, шкала вымяральнага прыбора нераўнамерная. Награванне спаю не залежыць ад роду току, таму тэрмаэлектрычныя прыборы выкарыстоўваюцца для вымярэння пастаяннага і пераменнага току нізкай і высокай частаты.

У тэрмаэлектрычных прыборах з бескантактным пераўтваральнікам (рыс. 3.18, *б*) гарачы спай тэрмапары электрычна аддзелены ад награвальніка тэрмаправоднай пракладкай *4*. Для павелічэння адчувальнасці прыбораў з бескантактнымі пераўтваральнікамі некалькі тэрмапар злучаюць паслядоўна.

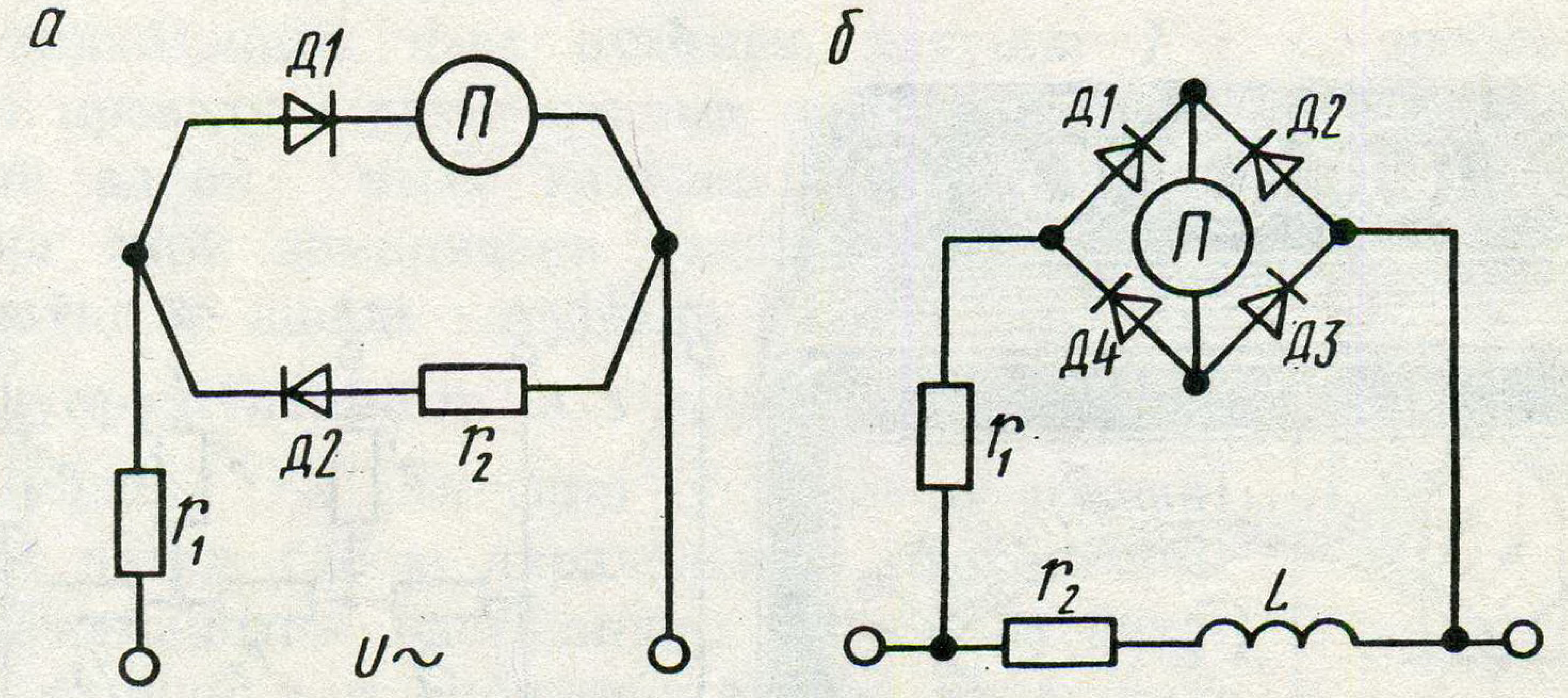


Рыс. 3.18. Схема тэрмаэлектрычнага прыбора:
а — з кантактным пераўтваральнікам; *б* — з бескантактным пераўтваральнікам; *в* — з пераўтваральнікам без нагрэву

У прыборах для вымярэння малых токаў тэрмапераўтваральнік змяшчаюць у сасуд, з якога выкачана паветра. У тэрмаэлектрычных прыборах з пераўтваральнікам без награвальніка (рыс. 3.18, *в*) награванне тэрмапары праводзіцца токам, які вымяраецца. У гэтых прыборах прымяняецца маставая схема, дзе плечамі з'яўляюцца розныя металы *m* і *n* тэрмапары. Ток, які вымяраецца, праходзіць па спаях *b* і *d* металаў *m* і *n* і награвае іх, а пункты *k* і *l* будуць халодныя. Пры награванні спаяў *b* і *d* з'явіцца тэрма-ЭРС і праз вымяральны прыбор пойдзе тэрматок.

Тэрмаэлектрычныя прыборы шырока выкарыстоўваюцца на практыцы для вымярэння пераменных токаў высокай частаты. Асноўнымі недахопамі гэтых прыбораў з'яўляюцца вялікая адчувальнасць да перагрузак і невялікі тэрмін службы.

Д э т э к т а р н ы я (выпрамляльныя) п р ы б о р ы (рыс. 3.19) складаюцца з вымяральнага магнітаэлектрычнага прыбора і германіевых або крэмніевых дыёдаў. Дэтэктарныя прыборы робяцца з адна- і двухпаўперыяднымі выпрамнікамі. Выпрамнікі служаць для пераўтварэння пераменнага току ў пульсуючы, які і вымяраецца прыборам. Для выраўноўвання супраціўлення пры абодвух напрамках току ў аднапаўперыядным выпрамленні паралельна прыбору з дыёдам *Д*1 уключаюцца супраціўленне r_2 і дыёд *Д*2 (рыс. 3.19, *а*). Для двухпаўперыяднага выпрамлення прымяняецца маставая схема (рыс. 3.19, *б*).



Рыс. 3.19. Схема прыбора дэтэктарнай сістэмы:
а — з аднапаўперыядным выпрамнікам; *б* — з двухпаўперыядным выпрамнікам

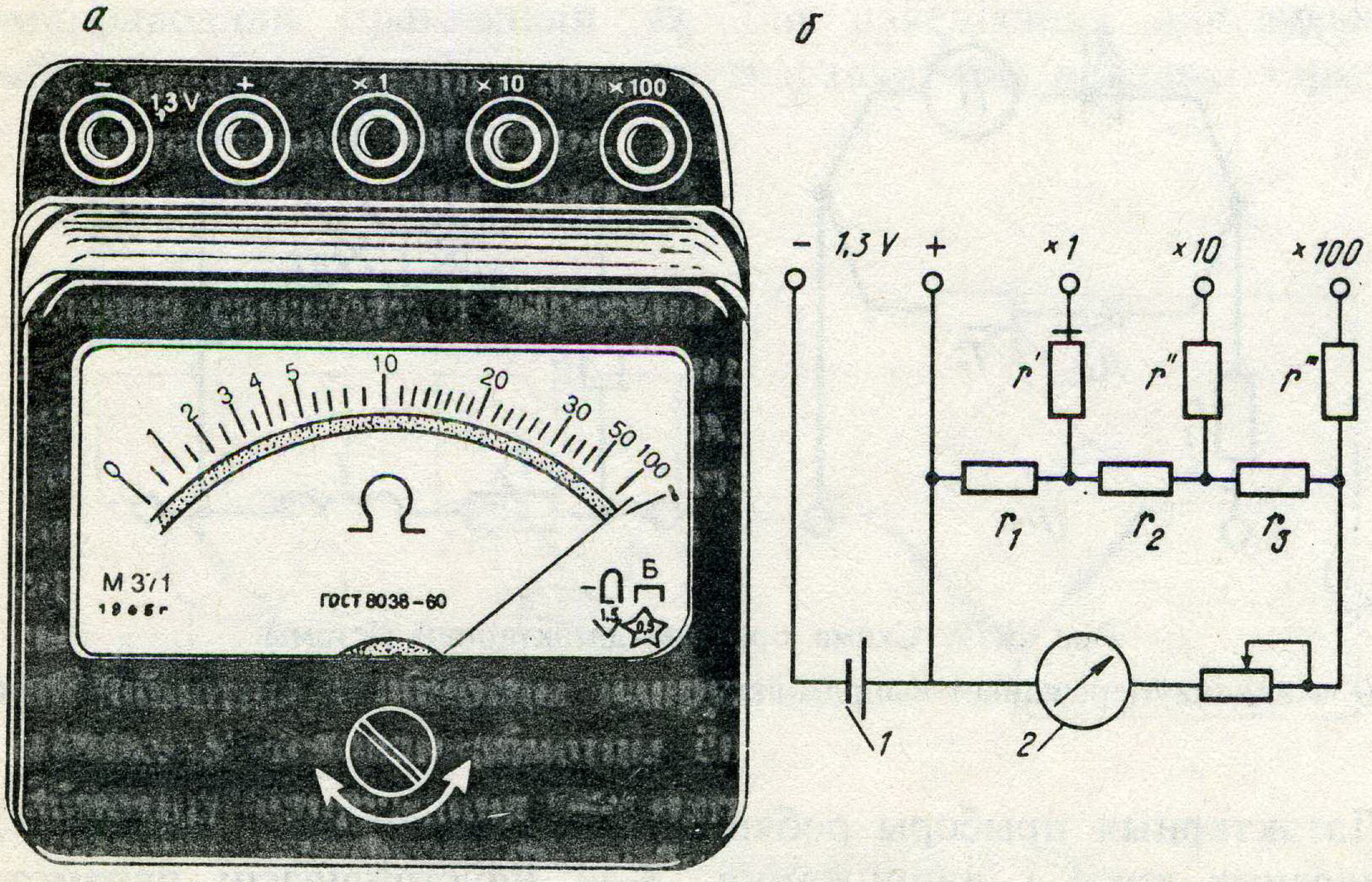
Дэтэктарныя прыборы робяцца многагранічнымі і служаць для вымярэння току і напружання. З-за няўстойлівасці параметраў выпрамнікаў клас дакладнасці дэтэктарных прыбораў не вышэйшы за клас з хібнасцю 1,5.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Якія прыборы называюцца тэрмаэлектрычнымі?
2. Як зроблены тэрмаэлектрычныя прыборы з кантактнымі і бескантактнымі пераўтваральнікамі? З пераўтваральнікамі без награвальніка?
3. Як павялічваецца адчувальнасць тэрмаэлектрычных прыбораў?
4. Дзе прымяняюцца тэрмаэлектрычныя прыборы?
5. Назавіце недахопы тэрмаэлектрычных прыбораў.
6. Якія прыборы называюцца дэтэктарнымі?
7. Назавіце станоўчыя якасці дэтэктарных прыбораў.
8. Якія асноўныя недахопы дэтэктарных прыбораў?

3.11. Омметр. Мегаомметр

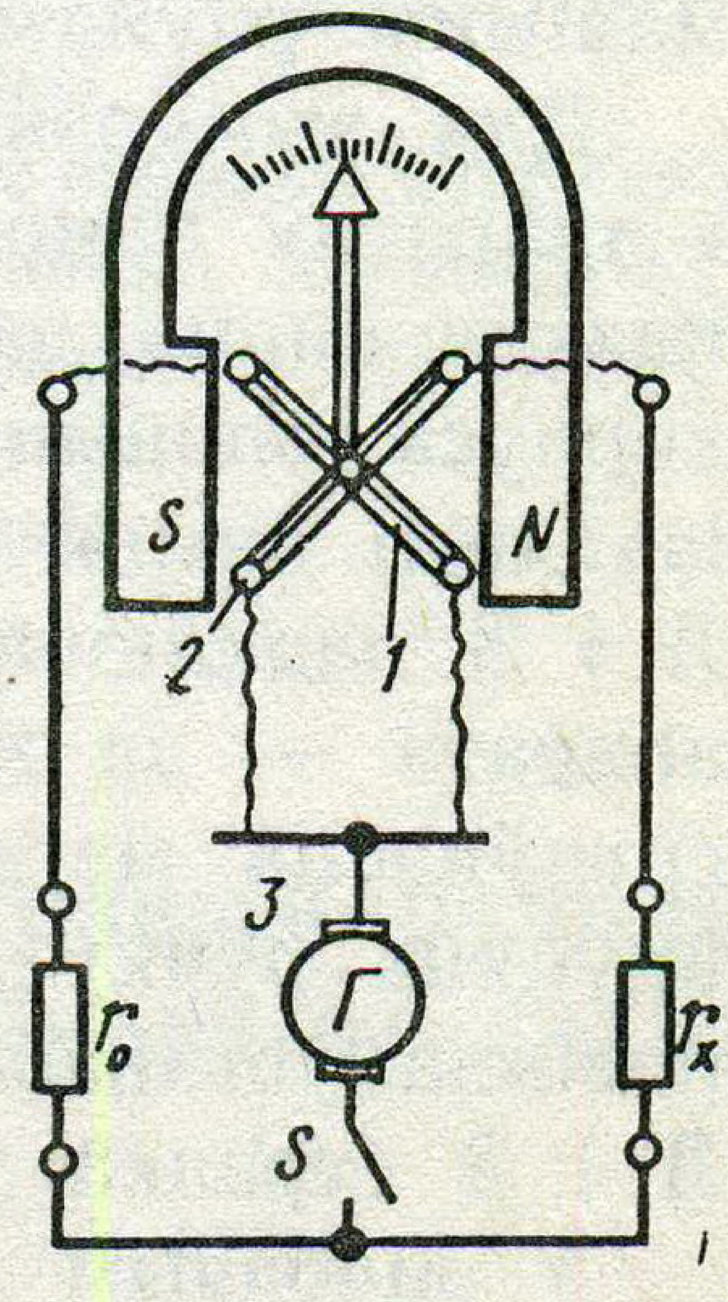
О м м е т р служыць для вымярэння супраціўлення пастаяннаму току. Омметр М-371 (рыс. 3.20) складаецца з міліамперметра *2* магнітаэлектрычнай сістэмы і крыніцы пастаяннага току *1*. Звычайна крыніцай току з'яўляецца сухі элемент 1,4 В, які ўстаўляецца ўнутр прыбора з тыльнага боку і закрываецца накрыўкай. На пярэднім баку омметра маецца пяць клем. Клемы — і + прызначаны для падключэння знешняй крыніцы току, калі адсутнічае сухі элемент унутры прыбора. Клемы –,



Рыс. 3.20. Омметр М-371:
а — знешні выгляд; *б* — схема

×1, ×10, ×100 служаць для падключэння супраціўлення, якое вымяраецца пры падключэнні вымернага супраціўлення да клем –1 і × 1 пастаянная дзялення шкалы омметра роўная 1 Ом, да клем –1 і × 10 — 10 Ом, да клем –1 і × 100 — 100 Ом. Змяненне пастаяннай дзялення шкалы омметра пры падключэнні клем вызначаецца размяшчэннем унутры омметра паміж другой і трэцяй клемамі супраціўлення r_1 = 10 Ом, паміж трэцяй і чацвёртай r_2 = 90 Ом і паміж чацвёртай і пятай клемамі r_3 = 900 Ом. У першым выпадку шунтом для міліамперметра з'яўляецца супраціўленне 10 Ом, у другім — 100 Ом, а ў трэцім — 1000 Ом. Гэта дае магчымасць карыстацца адной шкалой для вымярэння малых і вялікіх супраціўленняў. Супраціўленні r', r'', r''' служаць для абмежавання току пры ўстаноўцы стрэлкі на нуль. Перад пачаткам работы ў омметрах трэба ўстанавіць карэктарам стрэлку на ∞, што адпавядае знешняму супраціўленню ∞, ланцуг разамкнуты. Потым клемы, якія выбраны для падключэння вымернага супраціўлення, замыкаюць накаротка (знешняе супраціўленне роўнае нулю) і рэгулюючым супраціўленнем устанаўліваюць стрэлку омметра на нуль. Пасля гэтага падключаюць вымернае супраціўленне, і стрэлка на шкале прыбора пакажа яго значэнне.

М е г а о м м е т р — гэта магнітаэлектрычны лагометр, які прызначаны для вымярэння вялікіх супраціўленняў (ізаляцыі электрычных машын, апаратаў, кабеляў і правадоў). Мегаомметр (рыс. 3.21) складаецца з пастаяннага магніта, паміж полюсамі якога знаходзяцца дзве рухомыя катушкі *1* і *2*, зробленыя з тонкага проваду і размешчаныя пад вуглом 90° адна да адной. Гэтыя катушкі насаджаны на вось, на якой замацавана ўказальная стрэлка. Паслядоўна з адной катушкай уключаецца вядомае супраціўленне r_0, а з другой — вымернае супраціўленне r_x. Катушкі з супраціўленнямі злучаны паміж сабою паралельна і падключаны да дынамамашыны пастаяннага току *3* са знадворнай ручкай для вярчэння якара. Калі няма току ў катушках, рухомая сістэма мегаомметра знаходзіцца ў нейтральнай раўнавазе, стрэлка спыняецца на любым дзяленні шкалы. Ток да катушак падводзіцца з дапамогаю гібкіх стужак, якія не ствараюць процідзейнага моманту пры павароце катушкі. Пры праходжанні току па катушках на іх будуць дзейнічаць вярчальныя моманты, накіраваныя ў процілеглыя бакі:



Рыс. 3.21. Схема магнітаэлектрычнага лагометра для вымярэння супраціўленняў

$$M_1 = B_1 I_1 w_1 ld \text{ і } M_2 = B_2 I_2 w_2 ld,$$

дзе B_1 і B_2 — магнітныя індукцыі першай і другой катушак; I_1 і I_2 — токі ў першай і другой катушках; w_1 і w_2 — лікі віткоў у катушках; l і d — даўжыня і шырыня катушак.

Указальная стрэлка ўстановіцца ў раўнавазе пры роўнасці момантаў $M_1 = M_2$ або $B_1 I_1 w_1 ld = B_2 I_2 w_2 ld$. Запішам з гэтай роўнасці адносіну токаў $I_1/I_2 = B_2 w_2/(B_1 w_1)$. З другога боку, адносіну токаў можна запісаць ў такім выглядзе:

$$I_1/I_2 = U/(r_1 + r_0) : U/(r_2 + r_x) = (r_2 + r_x)/(r_1 + r_0),$$

дзе r_1 і r_2 — супраціўленні катушак.

Прыраўняем гэтыя формулы і ўбачым, што адносіна магнітных індукцый B_1 і B_2 залежыць ад размяшчэння катушак (вугла павароту катушак). Запішам:

$$I_1/I_2 = (r_2 + r_x)/(r_1 + r_0) = w_2 B_2/(w_1 B_1) = f(\alpha).$$

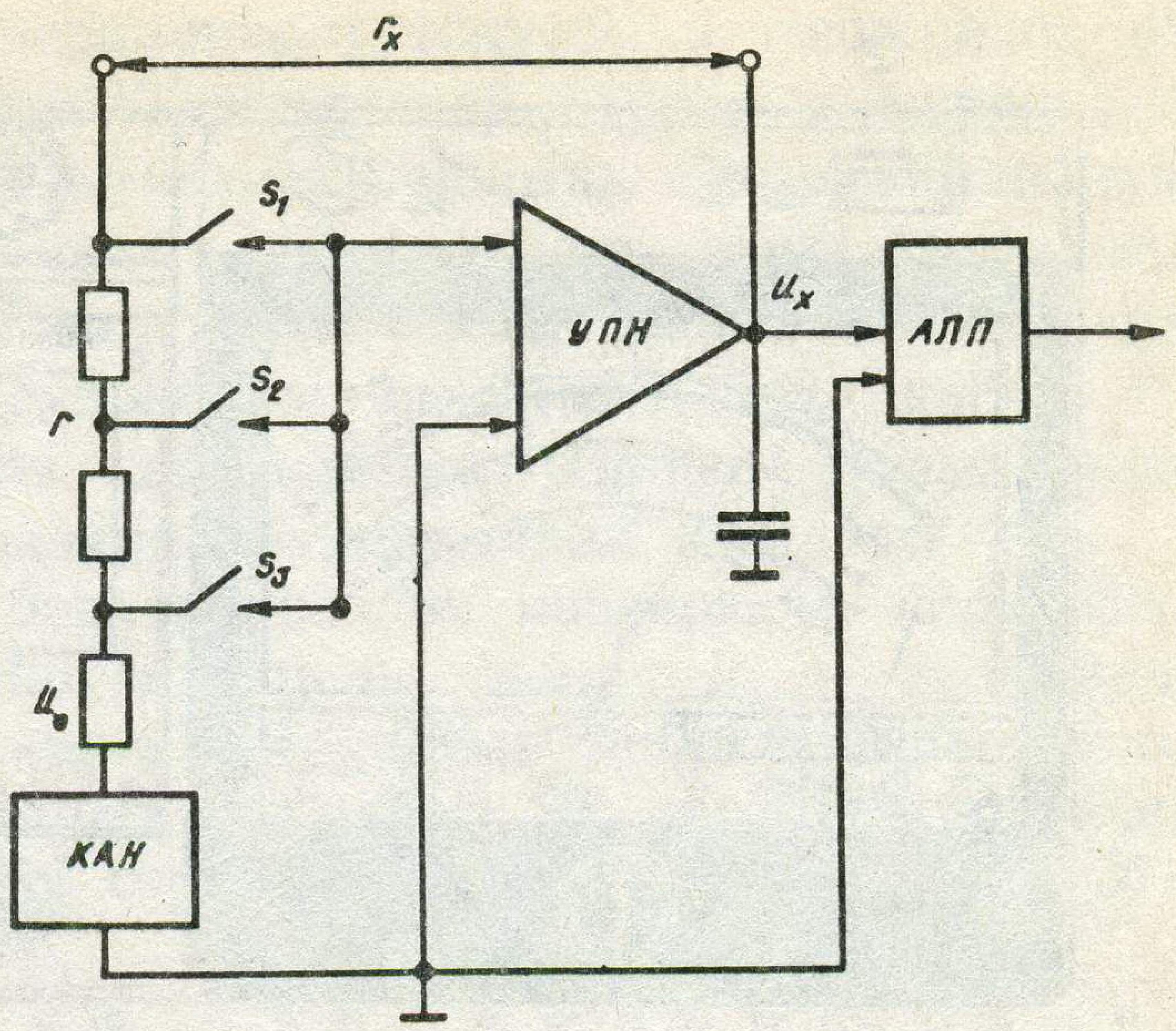
Такім чынам, вугал павароту ўказальнай стрэлкі прыбора залежыць ад вымернага супраціўлення r_x. Шкала мегаомметра градуіруецца ў кілаомах і мегаомах.

У мегаомметры маюцца клемы Л («лінія»), З («зямля»), Э («экран») і пераключальнік граніц вымярэння КОМ і МОМ. Супраціўленне падключаецца да клем Л і З, а ручку дынамамашыны раўнамерна верцяць з частатой каля 2 аб/с.

Для вымярэння супраціўленняў ізаляцыі электрычных машын і апаратаў адносна іх корпуса провад ад адной клемы Л або З падключаюць да жылы провада абмоткі, а ад другой клемы да корпуса машыны або апарата. Для вымярэння супраціўлення ізаляцыі паміж абмоткамі машыны або апарата правады ад клем Л і З падключаюцца да вываду абмотак, а корпус машыны або апарата — да клемы Э. Перад пачаткам вымярэння правяраюць спраўнасць мегаомметра, замыкаюць накоратка клемы Л і З і круцяць ручку дынамамашыны. Пры гэтым стрэлка мегаомметра павінна ўстанавіцца на нуль прыбора. Пры незамкнутых клемах Л і З стрэлка ўстанаўліваецца на ∞.

У лічбавым омметры (у межах вымярэння супраціўлення ад 100 Ом да 10 МОм) ва ўваходным блоку выконваецца пераўтварэнне супраціўлення ў пастаяннае напружанне, якое потым падаецца на ўваход блока АЛП (рыс. 3.22). У такім омметры вымернае супраціўленне r_x падключаецца ў ланцуг паралельнай адмоўнай зваротнай сувязі ўзмацняльніка УПН, а на ўваход

узмацняльніка праз рэзістар-дзельнік r падаецца стабільнае дакладнае напружанне U_0 ад крыніцы апорнага напружання (КАН). Выхадное напружанне ўзмацняльніка УПН вызначаецца па формуле $U_x = (U_0/r)\,r_0$. Далей выхадное пастаяннае напружанне ўзмацняльніка, якое прапарцыйна вымернаму супраціўленню, падаецца на ўваход аналага-лічбавага пераўтваральніка АЛП.



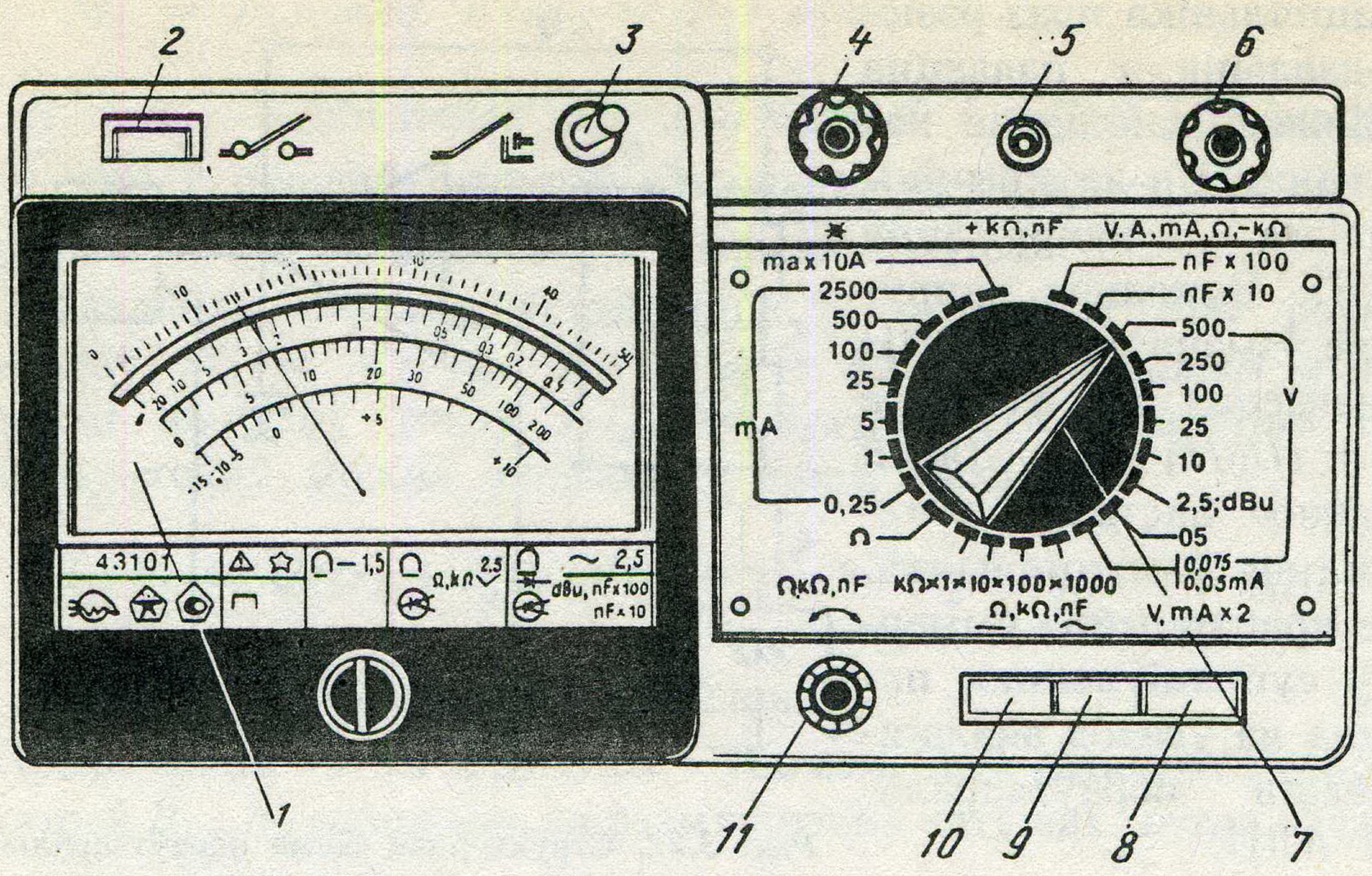
Рыс. 3.22. Структурная схема пераўтваральніка супраціўленняў у пастаяннае напружанне

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зроблены омметр М-371 і для чаго ён прымяняецца?
2. Што трэба зрабіць, каб падрыхтаваць омметр для вымярэння супраціўлення?
3. Як стрэлка омметра ўстанаўліваецца на нуль?
4. Чаму трэба зноў устанавіць стрэлку на нуль пры падключэнні да іншай клемы?
5. Як растлумачыць значэнні клем ×1, ×10, ×100 омметра?
6. Як зроблены магнітаэлектрычны мегаомметр? Растлумачце прынцып яго работы.
7. Як вымяраецца супраціўленне ізаляцыі электрычнай машыны або апарата?
8. Як ажыццяўляецца пераўтварэнне супраціўлення ў пастаяннае напружанне ў лічбавым омметры?
9. Якія станоўчыя бакі і недахопы маюць лічбавыя омметры?

3.12. Прыбор электравымяральны камбінаваны 43101

Прыбор электравымяральны камбінаваны 43101 (рыс. 3.23) прызначаны для вымярэння: напружання пастаяннага і пераменнага току ад 0,075 да 500 В з граніцамі шкалы вымярэння 0,075; 0,5; 2,5; 10; 25; 100; 250 і 500 В, а з множнікам «V, mA×2» — да 1 000 В; сілы пастаяннага і пераменнага току ад 0,05 мА да



Рыс. 3.23. Прыбор электравымяральны камбінаваны 43101

10 А з граніцамі шкалы вымярэння 0,05; 0,25; 1; 25; 100; $5 \cdot 10^2$; $2{,}5 \cdot 10^3$ і $1 \cdot 10^4$ мА, а з множнікам «V, mA × 2» — да 5 А; супраціўленне пастаяннаму току ад 0,2 да $1 \cdot 10^4$ кОм з граніцамі вымярэння двух шкал 0,2; 10; 100; $1 \cdot 10^3$; $1 \cdot 10^4$ кОм; электрычнай ёмістасці ад 100 да 1000 пФ.

Вымяральным прыборам з'яўляецца міліамперметр магніта-электрычнай сістэмы на расцяжках з унутраным магнітам. Для вымярэння пераменнага току ў прыборы маецца выпрамнік на дыёдах КД521В. Пашырэнне граніц вымярэння напружання ажыццяўляецца з дапамогаю рэзістараў, падключаных паслядоўна міліамперметру, а пашырэнне граніц вымярэння сілы току — з дапамогаю універсальнага шунта, які складаецца з ланцужка рэзістараў.

Вымяральны ланцуг супраціўлення пастаяннага току складаецца з крыніцы пастаяннага току (сухі элемент А316 устаноўлены ў камеру з тыльнага боку прыбора і закрыты накрыўкай), міліамперметра пастаяннага току і аперацыйнага ўзмацняльніка. Электравымяральны камбінаваны прыбор забяспечаны аўтаматычнай засцярогай ад кароткачасовых электрычных перагрузак пры вымярэнні сілы і напружання пастаяннага і пераменнага току, але не больш за 50 А у паслядоўных і за 2 кВ у паралельных электрычных ланцугах.

На пярэднім баку корпуса прыбора размешчаны органы кіравання і адліку: цыферблат міліамперметра *1*, ручка ўстаноўкі нуля омметра *11*, кнопкі: уключэння ланцуга пастаяннага току

10, уключэння ланцуга пераменнага току *9,* з множнікам «V, mA × 2» *8,* пераключальнік дыяпазонаў і роду вымярэння *7,* клемы *4* і *6* падключэння вымерных велічынь (напружання, сілы току, супраціўлення ў омах і пераменнага напружання пры вымярэнні ёмістасці кандэнсатара); клема *6* і гняздо *5* для падключэння вымернага супраціўлення ў кілаомах; клема *4* і гняздо *5* для падключэння кандэнсатара; кнопка аўтаматычнай засцярогі *3*; кнопка ўключэння аўтаматычнай засцярогі *2.*

Пры падрыхтоўцы прыбора да работы правяраюць спраўнасць аўтаматычнай засцярогі. Націскаюць на кнопку *10* — уключаюць вымяральны ланцуг пастаяннага току, потым націскаюць на кнопку *3* — уключаюць аўтаматычную засцярогу. У спраўным прыборы пры націсканні на кнопку *2* стрэлка прыбора адхіляецца на 37—47 дзяленняў шкалы V, A.

Д л я в ы м я р э н н я н а п р у ж а н н я п а с т а я н н а г а т о к у выконваюць наступныя аперацыі: націскаюць на кнопку *10*; уключаюць вымяральны ланцуг пастаяннага току; пераключальнікам *7* устанаўліваюць граніцу вымернага напружання; карэктарам, калі гэта неабходна, устанаўліваюць стрэлку прыбора на нуль па шкале V, A; уключаюць аўтаматычную засцярогу і падключаюць клемы *4* і *6* да вымернага напружання. Значэнне вымернага напружання вызначаецца памнажэннем пастаяннай дзялення на лік дзяленняў, паказаных стрэлкай на шкале V, A. Пры адначасовым націску кнопак *10* і *8* з множнікам «V, mA × 2» паказанне прыбора памнажаюць на 2.

П р ы в ы м я р э н н і с і л ы п а с т а я н н а г а т о к у ў адрозненне ад вымярэння напружання пераключальнікам *7* устанаўліваюць граніцу вымернага току, а клемы *4* і *6* падключаюць у ланцуг для вымярэння сілы току ў ім. Значэнне сілы току вызначаецца памнажэннем пастаяннай дзялення на лік дзяленняў, паказаных стрэлкай на шкале V, A. Пры адначасовым націску кнопак *10* і *8* з множнікам «V, mA × 2» паказанне стрэлкі падвойваецца.

П р ы в ы м я р э н н і н а п р у ж а н н я п е р а м е н н а г а т о к у выконваюць наступныя аперацыі: націскаюць на кнопку *9* — уключаюць вымяральны ланцуг пераменнага току; пераключальнікам *7* устанаўліваюць граніцу вымярэння напружання; карэктарам устанаўліваюць стрэлку на нуль на шкале V, A; уключаюць аўтаматычную засцярогу і падключаюць клемы *4* і *6* да вымернага напружання. Значэнне вымернага напружання вызначаецца памнажэннем пастаяннай дзялення на лік дзяленняў, указаных стрэлкай на шкале V, A. Пры адначасовым націску на кнопкі *9* і *8* з множнікам «V, mA × 2» паказанне прыбора падвойваецца.

Для вымярэння сілы пераменнага току ў адрозненне ад вымярэння напружання пераключальнікам *7* устанаўліваюць граніцу вымернага току, а клемы *4* і *6* падключаюць у ланцуг для вымярэння сілы току ў ім. Значэнне сілы току вызначаецца па шкале V, A. Пры адначасовым націску на кнопкі *8* і *9* з множнікам «V, mA × 2» паказанне прыбора падвойваецца.

Для вымярэння супраціўлення пастаяннаму току ўключаюцца абедзве кнопкі *9* і *10* адначасова. Для вымярэння супраціўлення ў омах пераключальнік *7* устанаўліваюць на адзнаку Ω і ручкай *11* устанаўліваюць стрэлку прыбора на ∞ на шкале Ω. Потым падключаюць да клем *4, 6* вымернае супраціўленне і па шкале Ω вызначаюць супраціўленне ў омах. Для вымярэння супраціўлення ў kΩ пераключальнік *7* устанаўліваюць на адно з дзяленняў kΩ з граніцай вымернага супраціўлення, замыкаюць накоратка клему *6* і гняздо *5,* а ручкай *11* устанаўліваюць стрэлку на нуль справа па шкале kΩ. Потым падключаюць да клем *6* і гнязда *5* вымернае супраціўленне і па шкале kΩ вызначаюць супраціўленне ў kΩ з улікам множніка ×10, ×100, ×1000.

Для вымярэння ёмістасці абедзве кнопкі *10* і *9* уключаюцца адначасова, да клем *4* і *6* падключаецца крыніца пераменнага току 190—245 В частатой 50 Гц, а да клемы *4* і гнязда *5* падключаецца кандэнсатар, ёмістасць якога вымяраецца. Пераключальнік *7* устанаўліваецца на адно з дзяленняў пF × 10 або пF × 100. Ёмістасць вызначаецца па шкале пF з улікам множніка. Пры карыстанні камбінаваным прыборам забараняецца пераключэнне прыбора з аднаго віду вымярэння на другі, а таксама пераключэнне дыяпазонаў вымярэння без адключэння прыбора.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

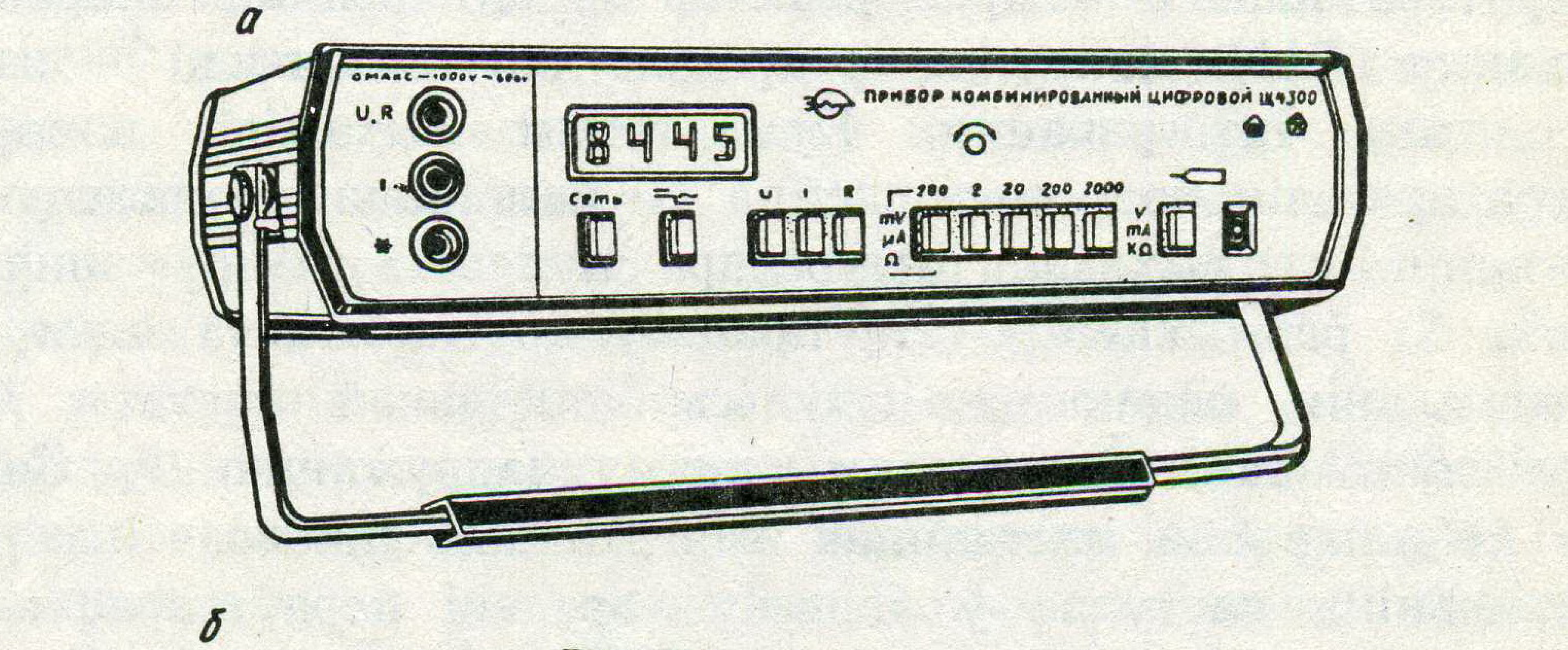
1. Якія велічыні і у якіх граніцах можна вымяраць з дапамогай камбінаванага электравымяральнага прыбора 43101?
2. Як пашыраюцца граніцы вымярэння напружання? Сілы току?
3. Як падрыхтоўваецца камбінаваны прыбор для вымярэння напружання пастаяннага току? Сілы пастаяннага току?
4. Як з дапамогай камбінаванага прыбора вымераць напружанне пераменнага току? Сілу пераменнага току?
5. Як камбінаваным прыборам вымяраецца супраціўленне пастаяннаму току ў омах, кілаомах?
6. Чаму пры пераключэнні граніц вымярэння трэба вызначаць новую пастаянную дзялення шкалы прыбора?

7. Чаму пры вымярэнні супраціўлення ў омах шкала прыбора прамая, а пры вымярэнні супраціўлення ў кілаомах адваротная?

8. Як камбінаваным прыборам вымераць ёмістасць кандэнсатара?

3.13. Прыбор камбінаваны лічбавы Шч 4300

Прыбор камбінаваны лічбавы Шч 4300 (рыс. 3.24) прызначаецца дл вымярэння сілы і напружання пастаяннага току, сілы і напружання пераменнага сінусоіднага току, супраціўлення пастаяннаму току. Прыбор складаецца з наступных асноўных блокаў і вузлоў: уваходнага дзельніка УД; пераўтваральніка пераменнага напружання у пастаяннае ($U\sim/U-$), току ў пастаяннае напружанне ($I/U-$), супраціўлення ў пастаяннае напружанне $r/U-$); уваходнага ўзмацняльніка (УУН); генератара апорнага напружання (ГАН); інтэгратара ($U_{\text{інт}}$); генератара стабільнай частаты (ГСЧ); схемы



Рыс. 3.24. Прыбор камбінаваны лічбавы:
а — знешні выгляд; *б* — структурная схема

кіравання (СК); нуль-органа (НО); вузла лічбавай індыкацыі (ВЛІ).

Уваходны дзельнік выкарыстоўваецца пры вымярэнні напружання ў дыяпазоне 20 кВ і вышэй. Ён складаецца са стабільных рэзістараў з каэфіцыентам 10, 100, 1000. Вымернае напружанне пераменнага току праз уваходны ўзмацняльнік падаецца на ўваход пераўтваральніка напружання. Пераўтваральнік напружання $(U_{\sim}/U_{-})$ уяўляе сабой актыўны пераўтваральнік выпрамленых значэнняў пераменнага напружання, выкананы па аднапаўперыяднай схеме і праградуяваны па сярэднеквадратычным значэнні сінусоіднага напружання.

Напружанне пастаяннага току U_X вымяраецца па метаду двухкантактнага інтэгравання. Працягласць першага інтэгравання задаецца адрэзкам часу генерацыі 2 000 імпульсаў генератара (ГСЧ). На працягу першага такта інтэгравання ключ S_1 замкнуты і на ўваход інтэгратара праз зарадны рэзістар r_3 падаецца вымернае напружанне U_X. Па заканчэнні першага такта ключ S_1 размыкаецца і схема кіравання ў залежнасці ад палярнасці напружання на ўваходзе нуль-органа замыкае ключ S_2 або S_3 і на ўваход інтэгратара падаецца праз рэзістар r_p ад крыніцы апорнага напружання (ГАН) напружанне процілеглай палярнасці — наступае другі такт інтэгравання. Пры гэтым выхадное напружанне інтэгратара лінейна змяншаецца з пастаяннай хуткасцю. Пры дасягненні на выхадзе інтэгратара нулявога напружання ключ S_2 або S_3 размыкаецца. На працягу другога такта інтэгравання на лічыльнік падаюцца імпульсы стабільнай частаты f_0. Лік імпульсаў N эквівалентны вымернаму напружанню U_x. Значыць, $N = kU_x$, дзе k — пастаянная інтэгравання. Лічбавая інфармацыя з лічыльніка паступае ў дэшыфратар, які пераўтварае двайчна-дзесятковы код у дзесятковы і візуальна выдае значэнне напружання на экране ў дзесятковым кодзе.

Пры вымярэнні току на ўваходзе прыбора выкарыстоўваецца пераўтваральнік (I/U_{-}), а пры вымярэнні супраціўлення — пераўтваральнік (r/U_{-}).

На пярэдняй панелі прыбора размешчаны: кнопка «Сетка» пераключальніка электрычнага сілкавання; кнопкі «U», «I», «R», «≂» пераключальнікаў роду вымернай велічыні; кнопкі пераключальніка дыяпазонаў вымярэння; кнопка «–◁» пераключальніка ўваходных ланцугоў; індыкатар «–◁», які сігналізуе аб пераключэнні прыбора ў рэжым вымярэння з дапамогай шчупа-індыкатара; ВЛІ, шліц-рэзістар ↶ для ўстаноўкі нуля прыбора; уваходныя гнёзды «U, R», «I» і «*».

На задняй панелі размешчаны: раз’ём 220 В 50 Гц для падключэння кабеля электрычнага сілкавання; раз’ём «—<□» для падключэння шчупа-індыкатара; трымальнік электрычнага засцерагальніка 0,25 А, клема «⏚» для падключэння прыбора да зазямлення.

Прыбор забяспечаны шчупам-індыкатарам у пластмасавым корпусе, які злучаецца з прыборам пры дапамозе кабеля. У шчуп-індыкатар уманціраваны кантактны шчуп і дадатковы ВЛІ.

Прыбор Шч 4300 прызначаецца для вымярэння напружання пастаяннага току ў граніцах ад 200 мВ да 1 000 В, напружання пераменнага току ў граніцах ад 200 мВ да 600 В; сілы пастаяннага і пераменнага току ад 200 мкА да 2 А і вымярэння супраціўлення ад 200 Ом да 20 МОм.

Гэтыя прыборы шырока прымяняюцца ў лабараторыях радыётэхнікі, а таксама ў лабараторыях фізікі і электратэхнікі.

Для падрыхтоўкі прыбора да работы трэба яго зазямліць — клему «⏚» злучыць з засцерагальным зязамленнем. Потым падключыць прыбор у сетку, націснуць на кнопку «Сетка», прагрэць прыбор на працягу 15 мін і ажыццявіць устаноўку нуля. Для гэтага трэба націснуць на кнопку «І» і на любую кнопку дыяпазонаў вымярэння, а потым вярчэннем восі рэзістара ↶ устанавіць на ВЛІ нулявое паказанне (кнопка «⎓~» павінна быць у адпушчаным становішчы). Для вымярэння супраціўлення ўстаноўку нуля трэба выконваць пры націснутай кнопцы «R» і закарочаных уваходных клемах «*», «U, R».

Для вымярэння напружання і сілы пастаяннага току, а таксама супраціўлення пастаяннаму току кнопка «⎓~» павінна быць у адпушчаным становішчы, а для вымярэння напружання і сілы пераменнага току — у націснутым. Потым націскаюць патрэбную кнопку пераключальніка роду вымярэння велічыні, кнопку дыяпазону вымярэння. Падключаюць вымерны аб’ект да ўваходу прыбора з дапамогай злучальных правадоў або шчупа-індыкатара. Пры вымярэнні з дапамогай злучальных правадоў шчуп-індыкатар адключаюць і ўстанаўліваюць кнопку «—<□» у адпушчанае становішча.

Пры вымярэнні напружання і супраціўлення пастаяннаму току злучальныя правады падключаюць да гнёздаў «*», «U, R», а пры вымярэнні току — да гнёздаў «*» і «І» і да вымернага аб’екта. Пры вымярэнні з дапамогай шчупа-індыкатара націскаюць на кнопку «—<□» і падключаюць шчуп-індыкатар да прыбора, а потым да вымернага аб’екта. З дапамогай шчупа-індыкатара можна ажыццяўляць вымярэнне напружання ў дыяпазоне 200 мВ — 200 В і супраціўленне пастаяннаму току на ўсіх дыяпазонах вымярэння.

1. З якіх блокаў і вузлоў складаецца камбінаваны лічбавы прыбор Шч 4300?

2. Для чаго служыць пераўтваральнік напружання і што ён сабою ўяўляе?

3. У чым сутнасць двухтактнага інтэгравання?

4. Як вызначаецца інтэрвал часу першага і другога такта інтэгравання?

5. Для чаго прызначаны генератар дакладнай частаты (ГДЧ)? Электронны лічыльнік?

6. Як вызначаецца значэнне вымеранага напружання?

7. Як выконваецца вымярэнне току і напружання з дапамогай прыбора Шч 4300?

8. Для чаго прызначаецца дэшыфратар?

9. У якім дыяпазоне можна вымераць напружанне і сілу пастаяннага і пераменнага току прыборам Шч 4300?

10. У якім дыяпазоне можна вымераць супраціўленне пастаяннага току прыборам Шч 4300?

11. Як падрыхтаваць прыбор Шч 4300 для вымярэння напружання і сілы пастаяннага току, напружання і сілы пераменнага току?

12. Як падрыхтаваць прыбор Шч 4300 для вымярэння супраціўлення і выканаць вымярэнне супраціўлення?

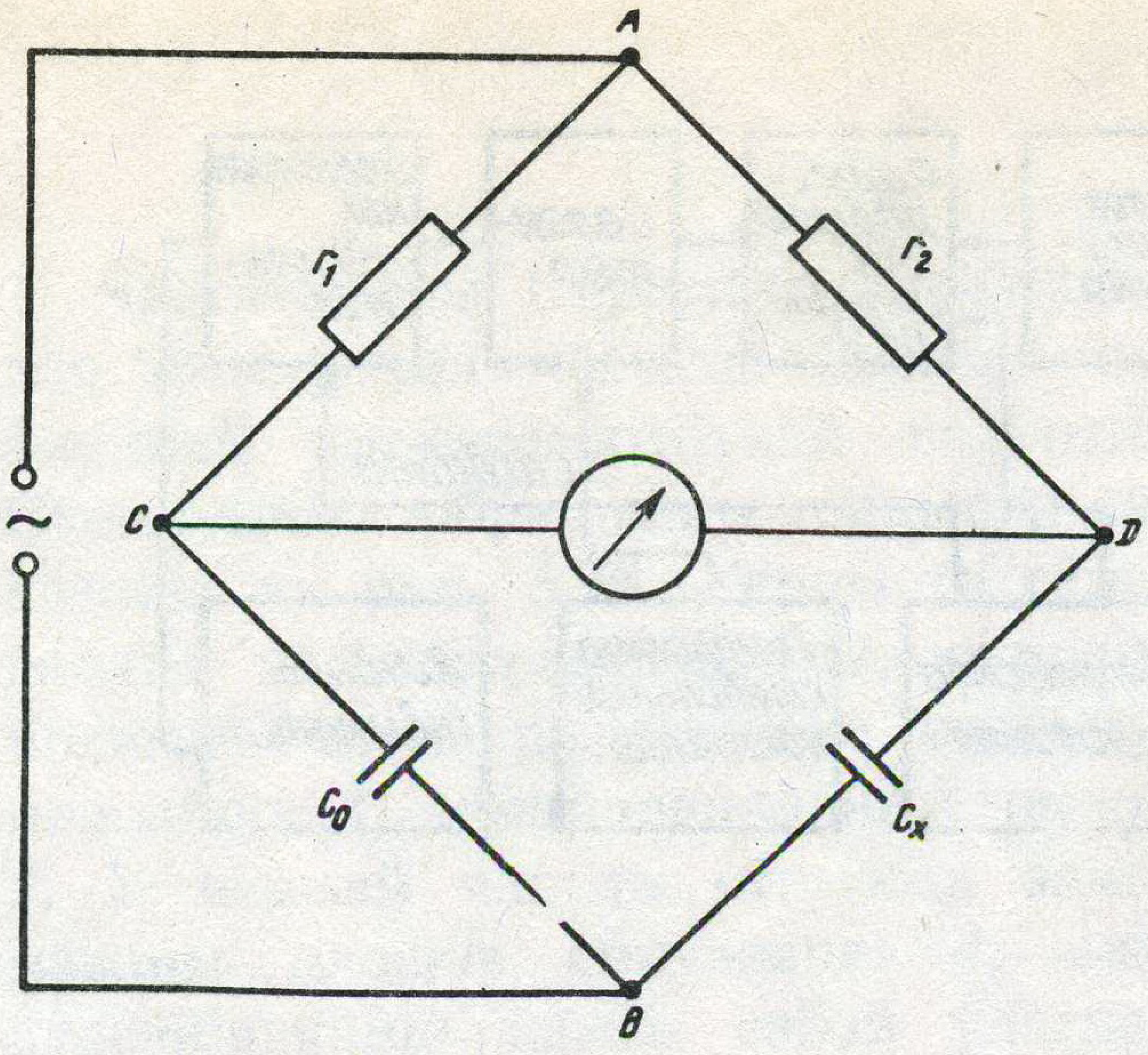
13. Як здзейсніць вымярэнне напружання, сілы току і супраціўлення з дапамогаю шчупа-індыкатара?

3.14. Вымярэнне ёмістасці. Фарадаметр

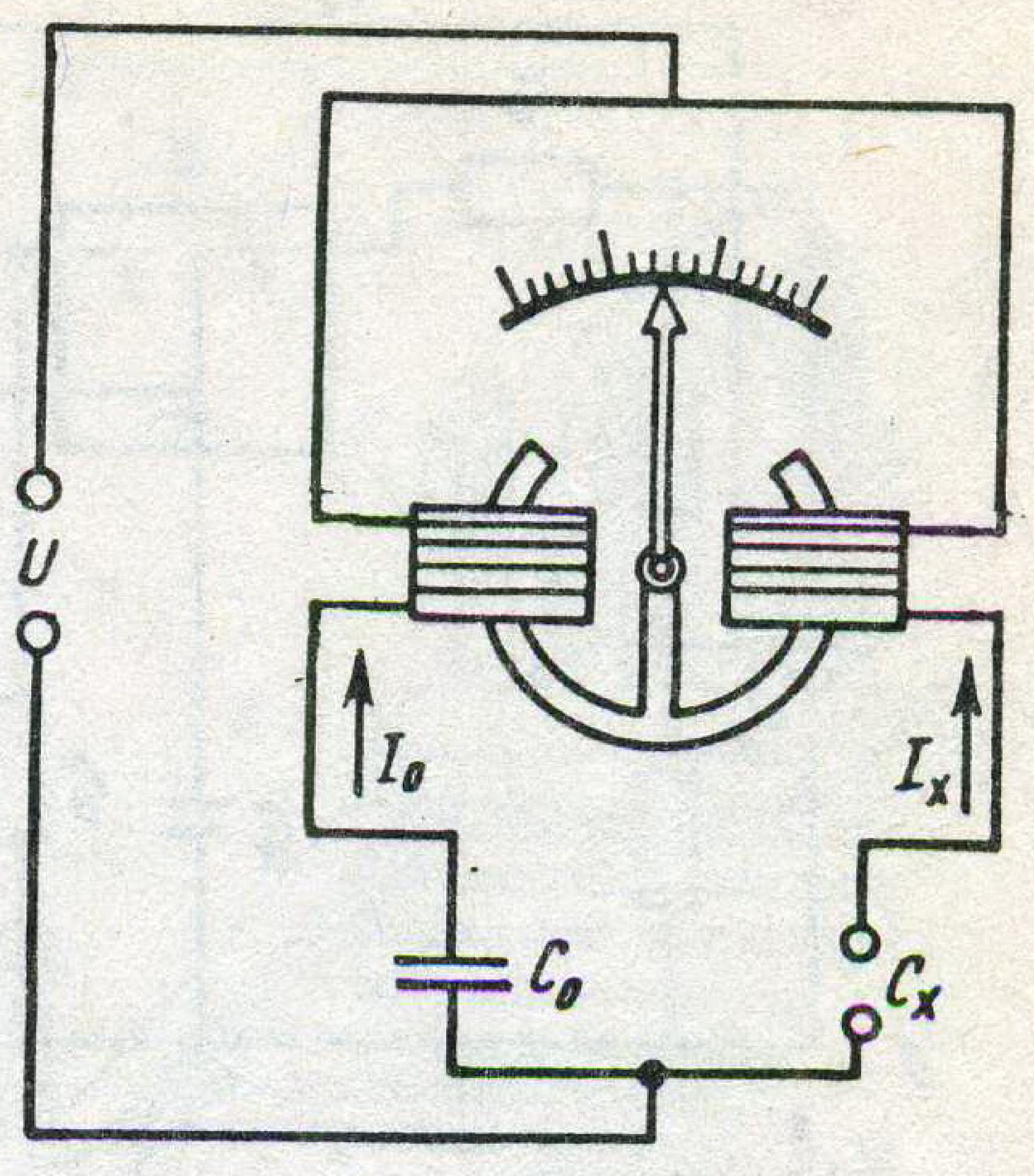
Ёмістасць кандэнсатара можна вымераць з дапамогаю моста на пераменным току (рыс. 3.25), дзе r_1 і r_2 — эталонныя рэзістары, C_0 — кандэнсатар вядомай ёмістасці, а C_x — невядомай ёмістасці (кандэнсатары аднатыпныя, актыўнае супраціўленне кандэнсатараў не ўлічваецца). Мост будзе ў раўнавазе, калі $r_1/r_2 = Z_3/Z_4 = \dfrac{I\,(1/(\omega C_0))}{I\,(1/(\omega C_x))}$. Адсюль $C_x/C_0 = r_1/r_2$. Значыць, $C_x = (r_1/r_2)\,C_0$.

Для вымярэння ёмістасці шырокае прымяненне атрымалі мікрафарадаметры электрамагнітнай сістэмы тыпа ЭФ і электрадынамічнай сістэмы тыпа Д-524.

Мікрафарадаметр ЭФ (рыс. 3.26) прадстаўляе сабой электрамагнітны лагометр, які складаецца з дзвюх катушак і фігурнага жалезнага стрыжня, насаджанага на вось з указальнай стрэлкай. Паслядоўна адной катушцы ўключана вядомая ёмістасць C_0, а паслядоўна другой — вымерная ёмістасць C_x. Абедзве катушкі



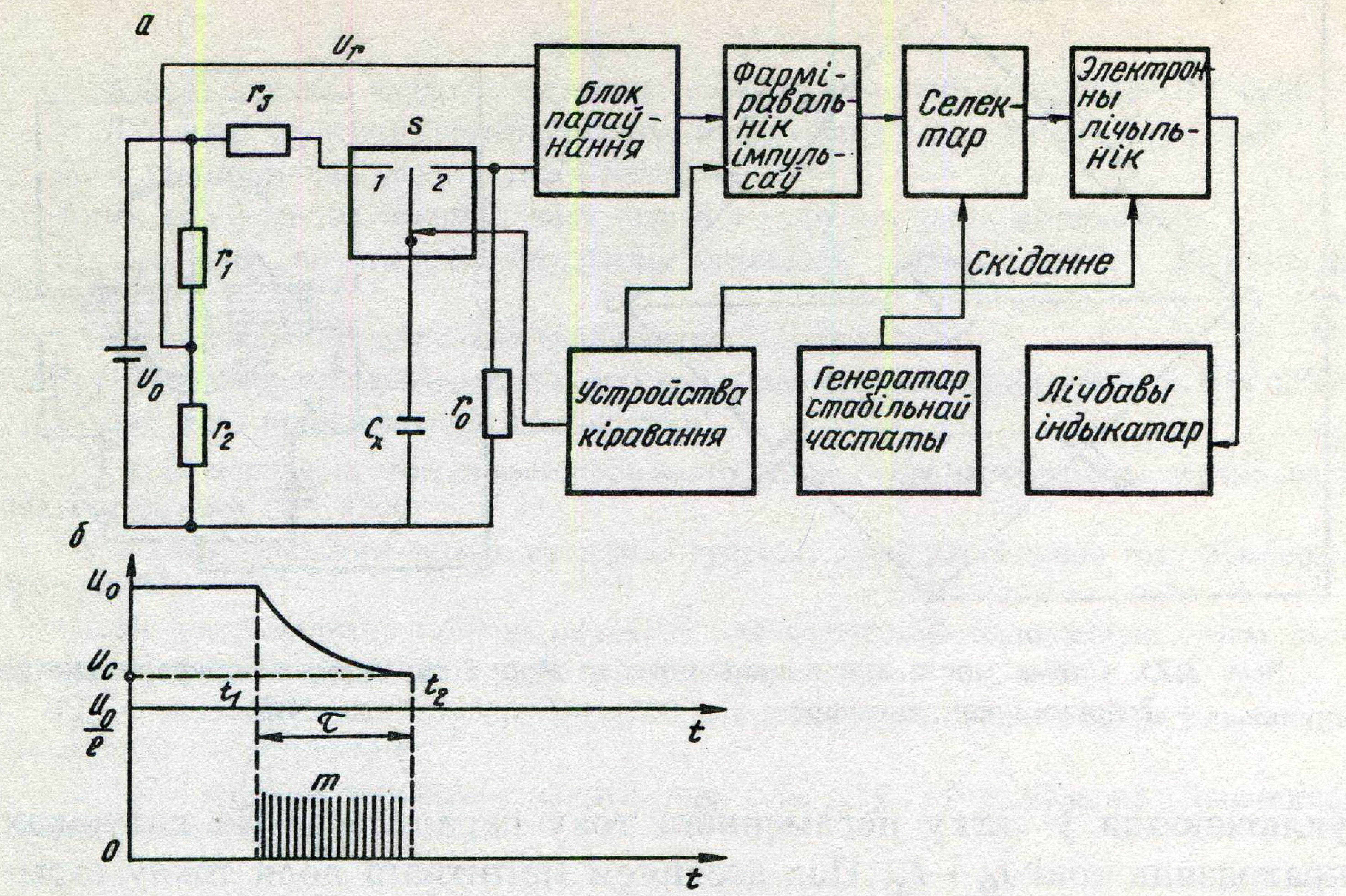
Рыс. 3.25. Схема моста для вымярэння ёмістасці кандэнсатара



Рыс. 3.26. Схема мікрафарадаметра ЭФ

ўключаюцца ў сетку пераменнага току паралельна. Па катушках праходзяць токі I_0 і I_x. Пад дзеяннем магнітнага поля токаў стрыжань намагнічваецца і ўцягваецца адной і другой катушкамі. Вугал павароту стрыжня (стрэлкі) вызначаецца стасункам токаў у катушках I_0/I_x або C_0/C_x. Такім чынам, па вугле адхілення ўказальнай стрэлкі можна вызначыць вымяраемую ёмістасць. Шкала прыбора праградуявана ў мікрафарадах. Аналагічна зроблены і мікрафарадаметр электрадынамічнай сістэмы.

Л і ч б а в ы ф а р а д а м е т р служыць для вымярэння ёмістасці з лікавай індыкацыяй і працуе па прынцыпе вымярэння прамежку часу разрада кандэнсатара праз рэзістар вядомага супраціўлення r_0. Спачатку кандэнсатар C_x праз ключ S (рыс. 3.27, *а*) падключаецца да крыніцы стабільнага напружання U_0 (пункт *1* на схеме). У момант часу t_1 устройства кіравання пасылае імпульс, які пераключае ключ S на клему *2*, і кандэнсатар пачынае разраджацца праз рэзістар r_0 па экспаненцыйным законе $U_c(t) = U_0 e^{-(t-t_1)\tau}$, дзе $e = 2{,}718$; $\tau = r_0 C_x$ — пастаянная часу разрада. З гэтага моманту пачынаецца адлік прамежку часу. На адзін уваход устройства параўнання падаецца напружанне $U_c(t)$, а на другі — пастаяннае напружанне з дзельніка $U_r = (r_2/(r_1+r_2))\, U_0$. Супраціўленне дзельніка $r_1 + r_2$ падбіраецца так, каб $r_2/(r_1 + r_2) + 1/e$, тады $U_r = U_0/e$. Праз прамежак часу τ пасля пачатку разраду напружанне на кандэнсатары $U_c = U_r = U_0/e$. У момант часу t_2 пры роўнасці $U_c = U_r$ устройства параўнання пасылае імпульс, які закрывае селектар, і



Рыс. 3.27. Структурная схема лічбавага фарадаметра (*а*) і дыяграма для тлумачэння прынцыпу яго работы (*б*)

падлік імпульсаў за час τ спыняецца. Лічыльнік паказаў m імпульсаў з перыядам T_0. Значыць, $m = \tau/T_0 = \tau f_0$. Паколькі $\tau = r_0C_x$, то $m = r_0f_0C_x$, а $C_x = m/(r_0f_0) = k_cm$.

Для зручнасці вылічэння значэння ёмістасці ў фарадах, мікрафарадах і пікафарадах прымяняецца $k_c = 10^{-n}$ Ф, дзе $n = 0, 6, 12$.

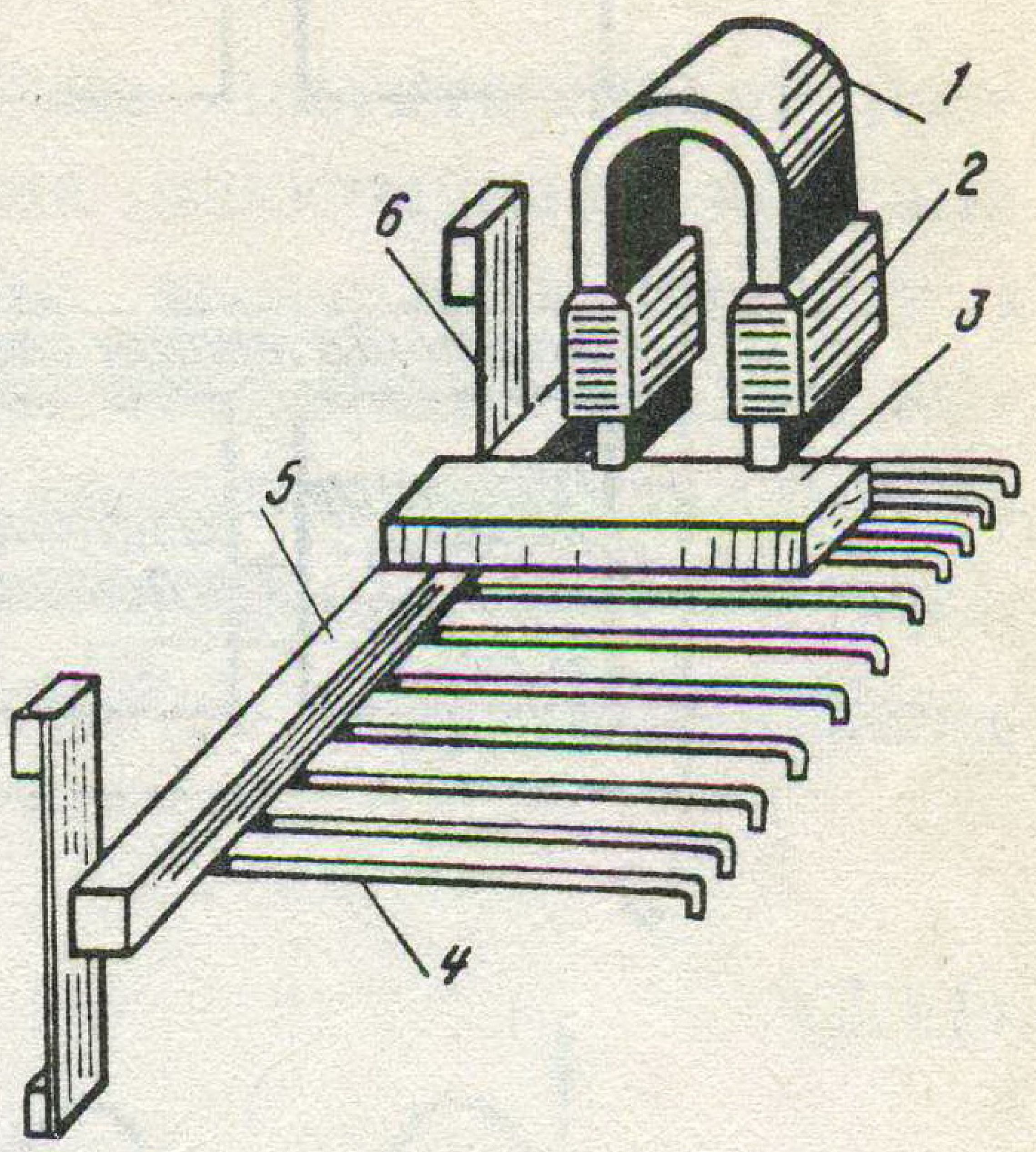
Напрыклад, пры $r_0 = 1$ кОм і $f = 1$ кГц $k_c = 10^{-6}$ Ф, тады ёмістасць кандэнсатара $C_x = m$ (мікрафарады).

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як вымераць ёмістасць кандэнсатара з дапамогай маставой схемы? Фарадаметра ЭФ?
2. Як зроблены фарадаметр ЭФ?
3. З якіх блокаў складаецца лічбавы фарадаметр?
4. Па якім прынцыпе працуе лічбавы фарадаметр?
5. Што такое інтэрвал часу τ і чым ён вызначаецца?
6. Пры якіх умовах селектар закрывае падлік імпульсаў лічыльнікам?
7. Як вызначаецца ёмістасць кандэнсатара ў фарадах, мікрафарадах і пікафарадах?

3.15. Частатамеры

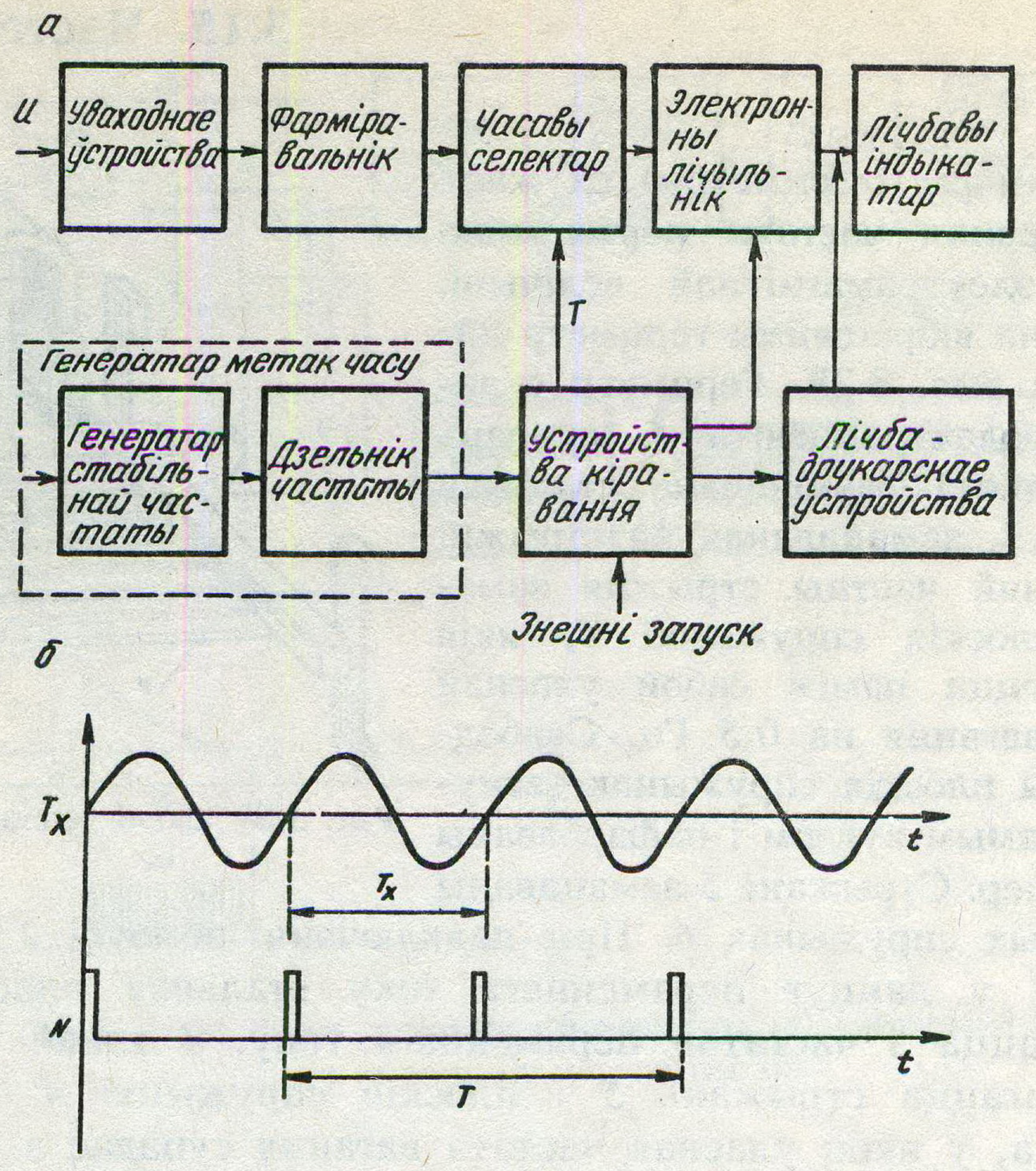
Частатамеры (герцметры) служаць для вымярэння частаты перыядычна зменнай электрамагнітнай велічыні. Схематычна вібрацыйны герцметр паказаны на рыс. 3.28. Герцметр складаецца з электрамагніта *1*, супраць полюсаў якога размешчана стальная пласцінка *3*, замацаваная на стрыжні *5*. У ніжняй частцы стрыжня замацаваны плоскія спружынкі *4*, якія адрозніваюцца паміж сабой уласнай частатой вагання на 0,5 Гц. Свабодныя канцы плоскіх спружынак загнуты пад прамым вуглом і пафарбаваны ў белы колер. Стрыжань *5* замацаваны на стальных спружынах *6*. Пры падключэнні абмоткі *2* электрамагніта *1* у ланцуг пераменнага току стальная пласцінка *3* будзе вагацца з частатой пераменнага току. З такой частатой будуць вагацца стрыжань *5* і плоскія спружынкі *4*. Плоская спружынка, у якой уласная частата вагання супадае з частатой току ў ланцугу, будзе рэзаніраваць і вагацца з найбольшай амплітудай.



Рыс. 3.28. Схема частатамера

З пярэдняга боку прыбора ў гарызантальным акенцы замест белага квадраціка рэзананснай плоскай спружынкі будзе бачна шэрая вертыкальная палоска. На пярэдняй частцы герцметра над кожным белым квадрацікам указваецца ўласная частата вагання пласцінкі. Такім чынам, па ўласнай частаце пласцінкі, якая вагаецца з найбольшай амплітудай, вызначаюць частату току ў ланцугу. Вібрацыйныя частатамеры прымяняюцца для вымярэння частот нізкіх ваганняў.

Лічбавыя частатамеры служаць для вымярэння частаты высокіх ваганняў. Работа лічбавага частатамера заключаецца ў падліку колькасці імпульсаў N, якія адпавядаюць ліку перыядаў невядомай частаты f_x, за пэўны інтэрвал часу T. Такім чынам, сярэдняе значэнне вымеранай частаты роўнае $f = N/T$ і выражана ў герцах. Структурная схема лічбавага частатамера паказана на рыс. 3.29. Фарміравальнік пераўтварае сінусоідныя або іншыя перыядычныя сігналы ў паслядоўнасць імпульсаў з вялікай крутасцю фронту, роўнай частаце вымернага сігнала. Часавы селектар уяўляе сабой электронны ключ, які адкрываецца на час вымярэння (T), на



Рыс. 3.29. Структурная схема лічбавага частатамера (*а*) і дыяграма для тлумачэння прынцыпу яго работы (*б*)

працягу якога ідзе падлік імпульсаў (N), а лічбавы індыкатар выдае вынік вымярэння ў герцах. Генератар меткі часу складаецца з генератара дакладнай частаты 1 МГц і дэкаднага дзельніка частаты (100, 10, 1 кГц; 100; 10,1; 0,1; 0,01 Гц), што адпавядае фарміраванню часу вымярэння 10^{-5}, 10^{-4} — 100 с.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зроблены вібрацыйны частатамер? Растлумачце прынцып яго работы.
2. Дзе прымяняюцца вібрацыйныя частатамеры?
3. Як вызначаецца частата сінусоіднай або іншай перыядычна зменнай велічыні лічбавым частатамерам?
4. Назавіце асноўныя вузлы лічбавага частатамера і раскажыце пра іх прызначэнне.
5. Якая роля фарміравальніка? Часавага селектара? Генератара метак?

3.16. Вымярэнне індуктыўнасці катушкі

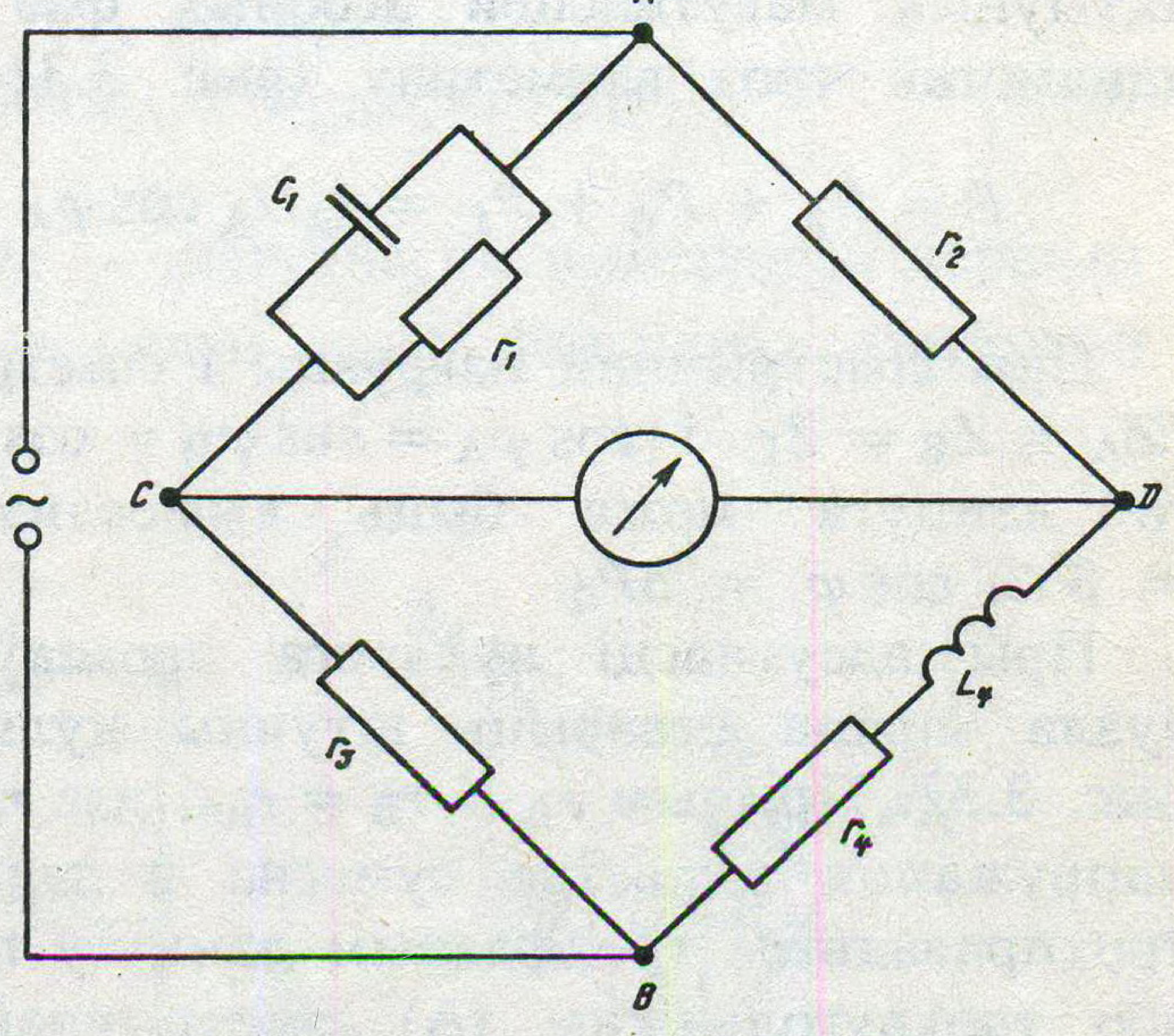
Прыборы для непасрэднага вымярэння індуктыўнасці распаўсюджвання не атрымалі. Для вымярэння індуктыўнасці катушкі карыстаюцца метадам моста або метадам вымярэння поўнага і актыўнага супраціўленняў. Вызначэнне індуктыўнасці метадам вымярэння супраціўленняў заключаецца ў наступным. З дапамогай амперметра і вальтметра вызначаюць поўнае супраціўленне катушкі. З раўнання поўнага супраціўлення $z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$ вылічваюць індуктыўнасць катушкі:

$$L = \sqrt{\frac{x^2 - r^2}{\omega^2}}. \qquad (3.11)$$

Актыўнае супраціўленне катушкі r вызначаецца па формуле $r = P/I^2$ (P — магутнасць, I — ток у катушцы).

Такім чынам, калі ведаць частату пераменнага току, актыўнае і поўнае супраціўленні катушкі, можна вылічыць яе індуктыўнасць. Для атрымання індуктыўнасці ў генры супраціўленне катушкі трэба браць у омах.

Схема моста для вызначэння індуктыўнасці катушкі прыведзена на рыс. 3.30. У плечы AD і BC моста ўключаны эталонныя рэзістары r_2 і r_3. Катушка, індуктыўнасць якой вымяраецца, уключаецца ў плячо BD, а кандэнсатар вядомай ёмістасці C_1 і паралельны яму эталонны рэзістар r_1 — у плячо AC. Мост будзе ў раўнавазе, калі $Z_1/r_2 = r_3/Z_4$ або $Z_4 = r_2 r_3/Z_1 = r_2 r_3(1/r_1 + j\omega C_1)$. Значыць, $r_4 + j\omega L_4 = r_2 r_3/r_1 + r_2 r_3 j\omega C_1$.



Рыс. 3.30. Схема моста для вымярэння індуктыўнасці катушкі

Роўнасць рэчаісных частак комплексных лікаў дае магчымасць вызначыць актыўнае супраціўленне катушкі $r_4 = r_2 r_3/r_1$, а роўнасць уяўных частак дае магчымасць вызначыць індуктыўнасць

катушкі $L_4 = r_2 r_3 C_1$. Для атрымання індуктыўнасці катушкі ў генры супраціўленне рэзістараў трэба браць у омах, а ёмістасць кандэнсатара — у фарадах.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як вымераць індуктыўнасць катушкі з дапамогай амперметра і вальтметра? З дапамогай маставой схемы?
2. Пры якіх умовах устанаўліваецца раўнавага моста?
3. У якіх адзінках вымяраецца індуктыўнасць катушкі, калі ў разліковую формулу падставіць ёмістасць у мікрафарадах, а супраціўленне рэзістараў у омах?

3.17. Вымярэнне актыўнай магутнасці ў трохфазным ланцугу

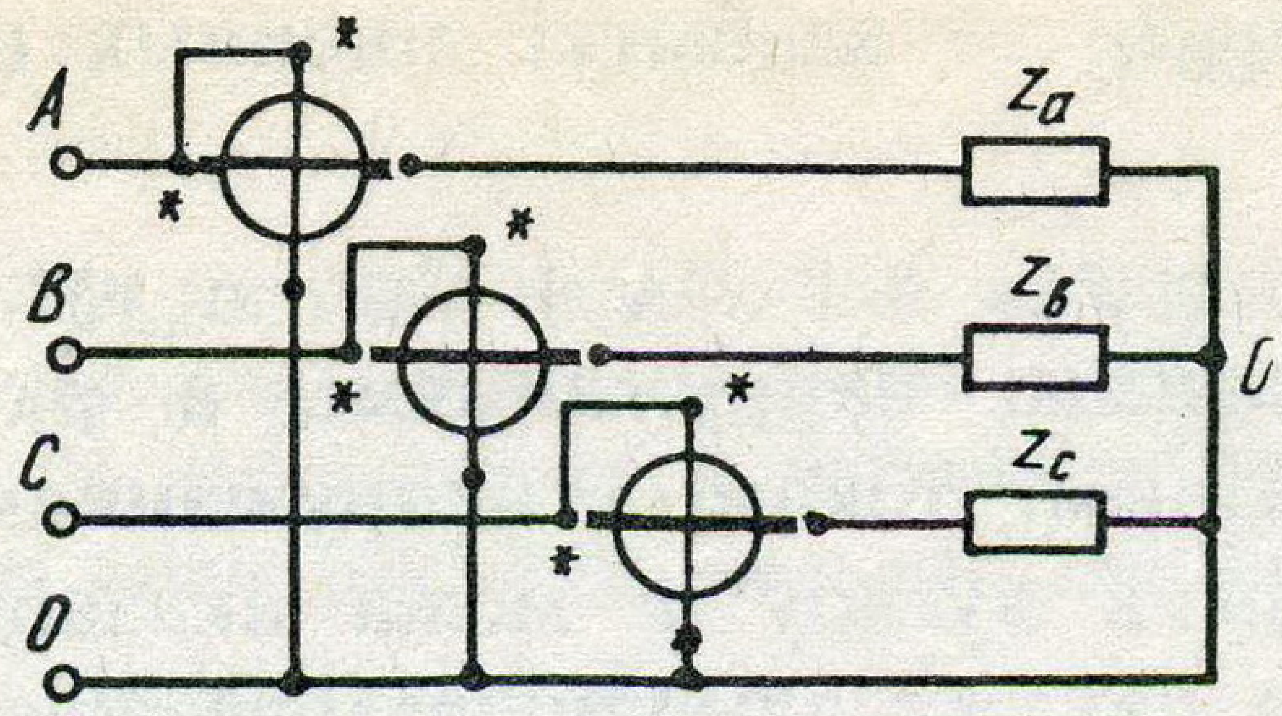
Пры несіметрычнай нагрузцы фаз у сістэме з нулявым провадам агульная актыўная магутнасць трохфазнай сістэмы роўная суме актыўных магутнасцей асобных фаз і можа быць вымерана з дапамогай трох ватметраў (рыс. 3.31):

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A U_A \cos\varphi_A + I_B U_B \cos\varphi_B + I_C U_C \cos\varphi_C.$$

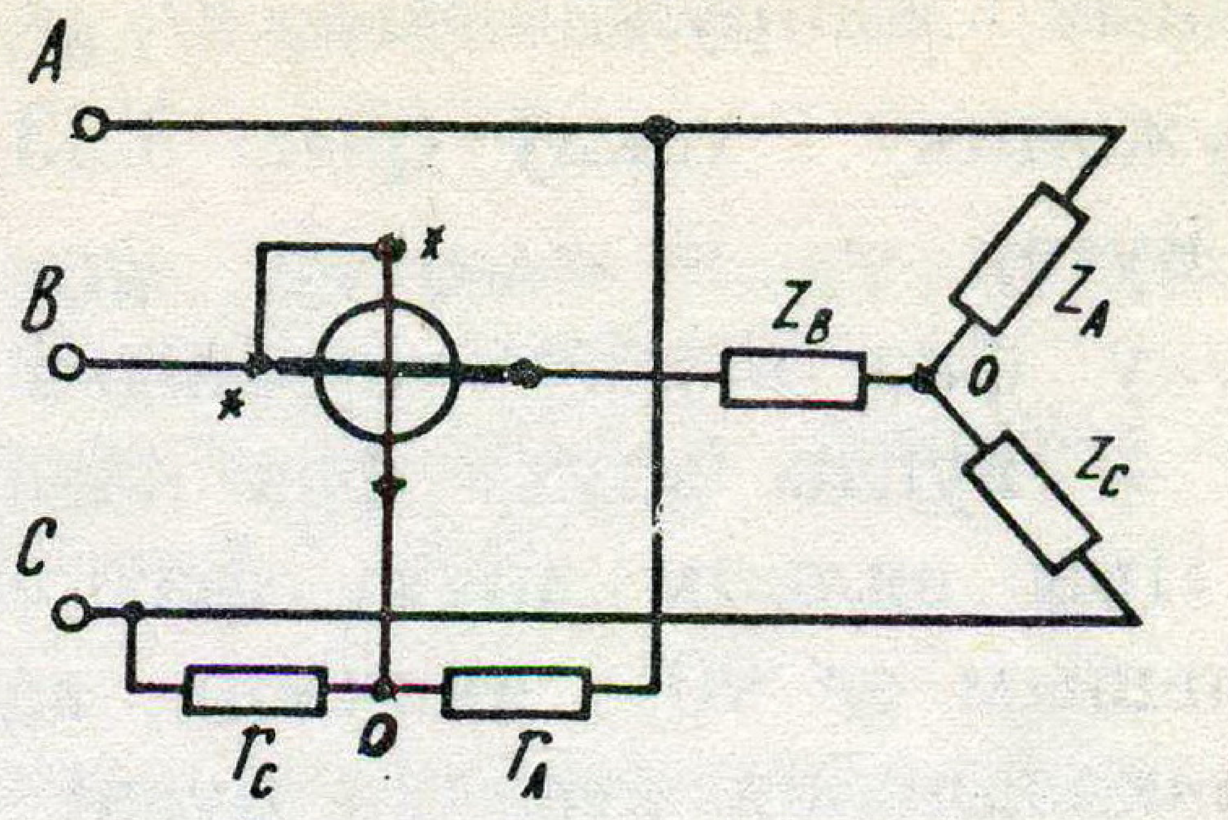
Пры сіметрычнай нагрузцы і сіметрычнай сістэме напружанняў ($Z_A = Z_B = Z_C$ і $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C$) магутнасць трохфазнага ланцуга можа быць вымерана адным ватметрам: $P = 3\,IU\cos\varphi = 3P_ф$.

Пры адсутнасці нулявога праваду і недаступнасці нулявога вузла можна стварыць штучны нулявы вузел, як паказана на рыс. 3.32. Прычым $r_A = r_B = r_{пр}$, дзе $r_{пр}$ — супраціўленне катушкі напружання ватметра сумесна з дадатковым супраціўленнем. У трохправадным трохфазным ланцугу пры падключэнні зоркай (Y) або трохвугольнікам (Δ) сіметрычнай і несіметрычнай нагрузкі фаз актыўная магутнасць можа быць вымерана з дапамогай двух ватметраў (рыс. 3.33). Няхай нагрузка злучана Y. Пры такім уключэнні сума паказанняў ватметраў дае поўную магутнасць сістэмы. Сапраўды, поўная імгненная магутнасць роўная магутнасці трох фаз:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \tag{3.12}$$



Рыс. 3.31. Схема ўключэння аднафазных ватметраў у трохфазны ланцуг пры несіметрычнай нагрузцы



Рыс. 3.32. Схема ўключэння ватметра пры недаступнасці нулявой кропкі

Паколькі пры адсутнасці нулявога праваду $i_A + i_B + i_C = 0$ або $i_B = -(i_A + i_C)$, то, падставіўшы ў формулу (3.12) значэнне i_B, атрымаем

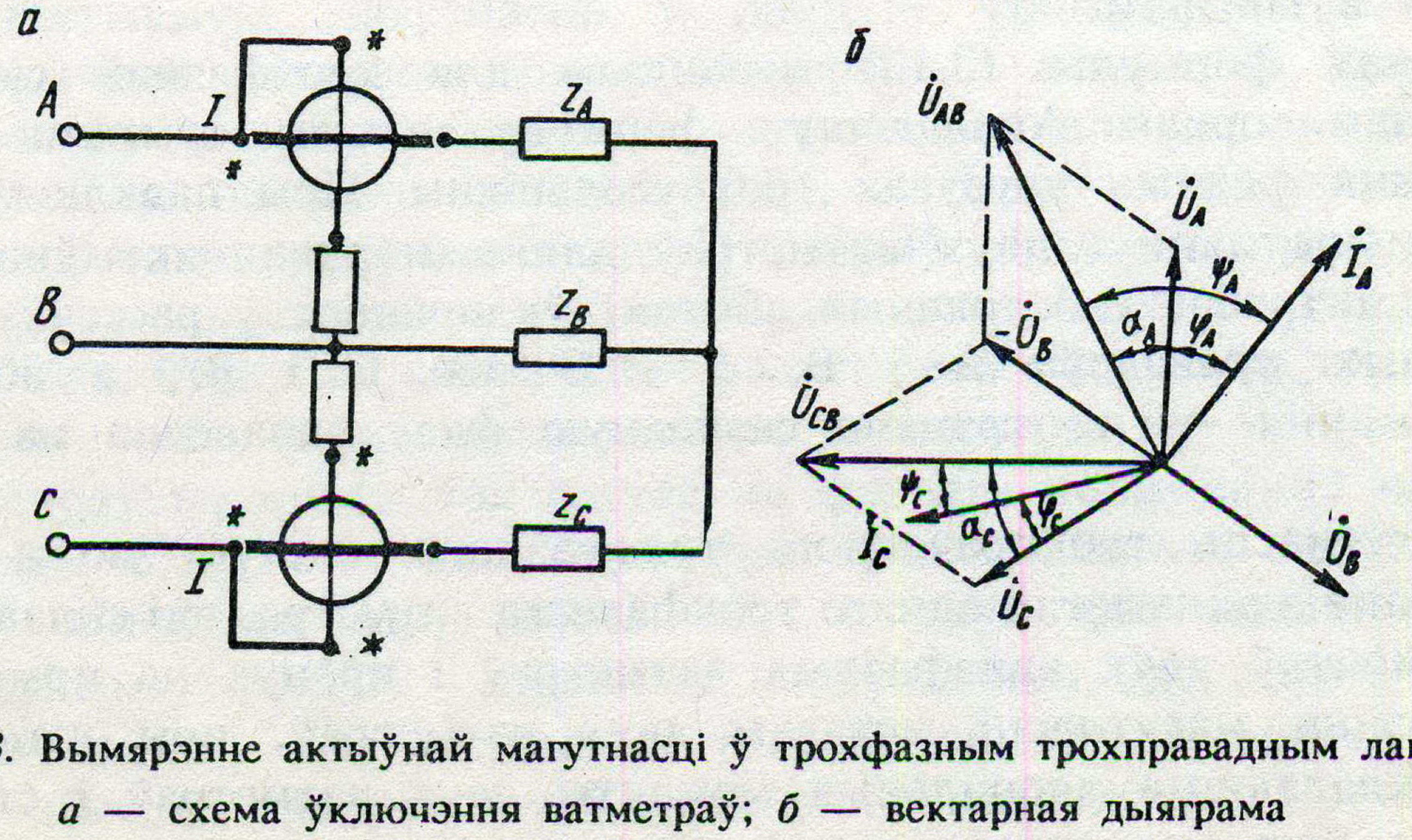
$$p = u_A i_A - u_B i_A - u_B i_C + u_C i_C = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C ,$$

дзе u_{AB} і u_{CB} — імгненныя лінейныя напружанні.

Сярэдняя магутнасць за перыяд вымяраецца ватметрам і роўная магутнасці сістэмы:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p dt = U_{AB} I_A \cos\psi_A + U_{CB} I_C \cos\psi_C , \qquad (3.13)$$

дзе $U_{AB} I_A \cos\psi_A$ і $U_{CB} I_C \cos\psi_C$ — магутнасці, вымераныя першым і другім ватметрамі; ψ_A і ψ_C — вуглы зруху фаз паміж лінейнымі



Рыс. 3.33. Вымярэнне актыўнай магутнасці ў трохфазным трохправадным ланцугу: *а* — схема ўключэння ватметраў; *б* — вектарная дыяграма

токамі і напружаннямі; $U_{AB}I_A$ і $U_{CB}I_C$ — здабыткі лінейных напружанняў і токаў (рыс. 3.33, *б*).

Вугал $\psi_A = \alpha_A + \varphi_A$, $\psi_C = \alpha_C - \varphi_C$, дзе α_A і α_C — вуглы зруху фаз паміж лінейнымі і фазнымі напружаннямі, а φ_A і φ_C — вуглы зруху фаз паміж фазнымі токамі і напружаннямі.

Пры вялікім зруху фаз φ адзін з вуглоў ψ можа аказацца большым за 90°, значыць, ватметр пакажа адмоўную магутнасць і паказальная стрэлка будзе адхіляцца ўлева. У гэтым выпадку трэба памяняць месцамі падключэнне да клем катушкі напружання ватметра і паказанне гэтага ватметра адняць ад паказання другога ватметра.

Пры сіметрычнай нагрузцы фаз

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA};\ I_A = I_B = I_C;\ \alpha = 30°;$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$$

атрымаем

$$P = P_1 + P_2 = IU\cos(30° + \varphi) + IU\cos(30° - \varphi) =$$
$$= 2IU\cos 30° \cos\varphi = \sqrt{3}\, IU\cos\varphi .$$

Пры павелічэнні φ адзін ватметр будзе змяншаць паказанне, а другі павялічваць. Пры $\varphi = 60°$ паказанне першага ватметра роўнае 0, а пры $\varphi > 60°$ стрэлка будзе адхіляцца ўлева.

Пры актыўнай раўнамернай нагрузцы $\varphi = 0$ і $P_1 = P_2 = P_{пр}$, а магутнасць трохфазнай сістэмы $P = 2P_{пр}$.

Такім чынам, у трохправадным трохфазным ланцугу з актыўнай раўнамернай нагрузкай актыўную магутнасць можна вымераць адным ватметрам.

Вывад формулы (3.13) выкананы для трохфазнай сістэмы, злучанай зоркай. Аналагічную формулу можна атрымаць і для злучэння фазных нагрузак трохвугольнікам. Пры падключэнні ў трохфазны ланцуг двух ватметраў для вымярэння актыўнай магутнасці трэба, каб токавыя абмоткі ўключаліся ў рассечку двух лінейных правадоў (А і В, А і С або С і В), а абмотка напружання — на трэцюю свабодную фазу адпаведна на С, В і А.

Магутнасць трохправаднога трохфазнага ланцуга можа быць вымерана з дапамогай аднаго трохфазнага ватметра, які складаецца з элементаў двух аднафазных ватметраў і працуе на прынцыпе вымярэння магутнасці метадам двух ватметраў, пры гэтым на восі складаюцца вярчальныя моманты двух ватметраў і стрэлка пакажа ўсю магутнасць трохфазнага ланцуга.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як трэба падключыць аднафазны ватметр у трохфазны ланцуг з сіметрычнай нагрузкай, злучанай зоркай, для вымярэння актыўнай магутнасці?

2. Ці аднолькавую магутнасць пакажа ватметр, уключаны ў трохфазны ланцуг на схеме рыс. 3.32, калі нагрузку пераключыць з Y на Δ?

А д к а з: $P_{\Delta} = 3P_{Y}$.

3. Як вымераць магутнасць у трохфазным чатырохправадным ланцугу пры несіметрычнай нагрузцы фаз?

4. Калі прымяняецца метад двух ватметраў для вымярэння актыўнай магутнасці ў трохфазным ланцугу?

5. Пры якіх умовах пры вымярэнні актыўнай магутнасці метадам двух ватметраў адзін ватметр пакажа нуль магутнасці?

6. Пры якіх умовах пры вымярэнні актыўнай магутнасці метадам двух ватметраў адзін ватметр пакажа адмоўную магутнасць? Як вызначыць пры гэтым магутнасць трохфазнага ланцуга?

7. Калі можна вымераць актыўную магутнасць у трохфазным трохправадным ланцугу адным аднафазным ватметрам? Як вызначыць пры гэтым магутнасць трохфазнага ланцуга?

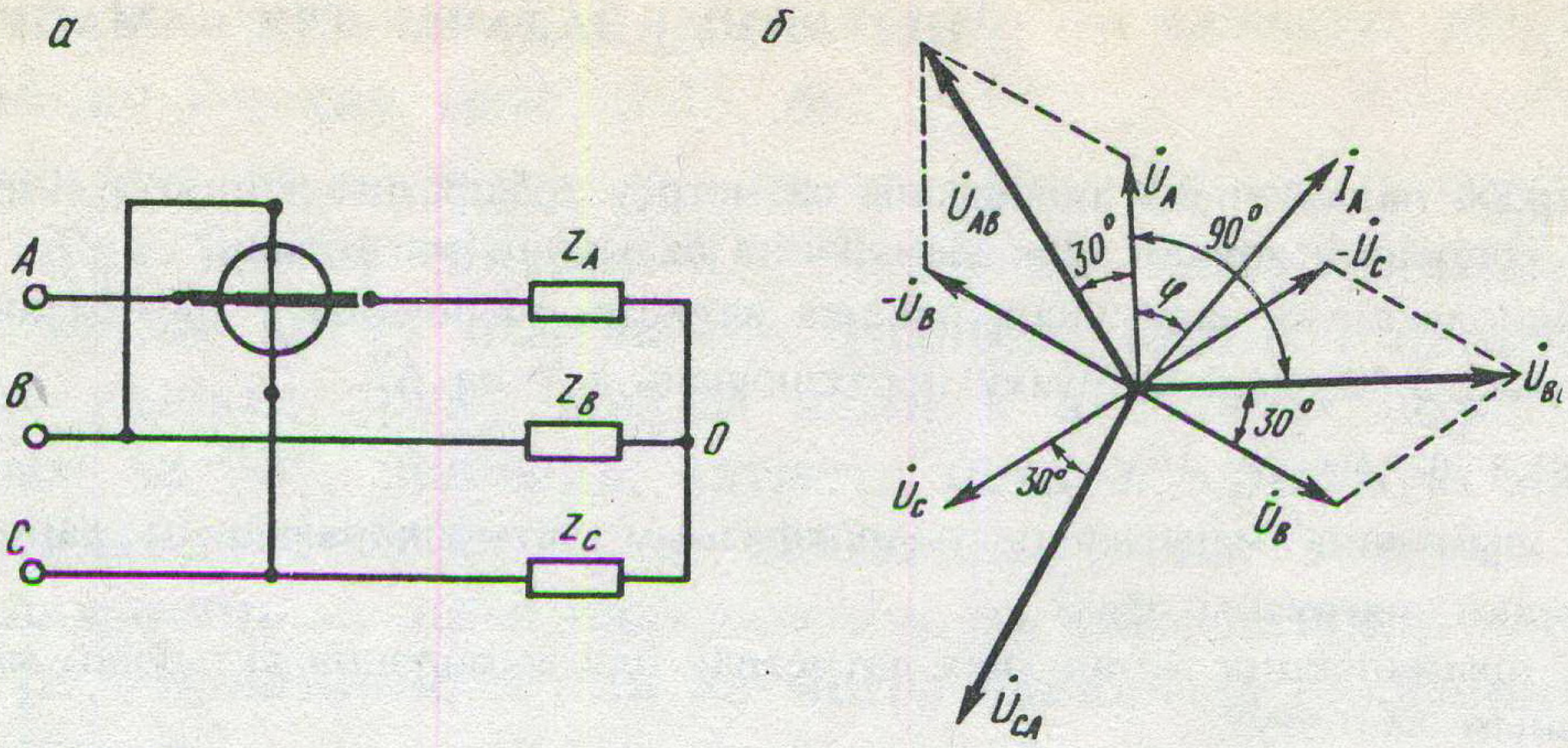
8. Калі абодва ватметры, уключаныя ў трохфазны ланцуг па схеме рыс. 3.33, пакажуць аднолькавую магутнасць?

А д к а з: Пры сіметрычнай актыўнай нагрузцы.

3.18. Вымярэнне рэактыўнай магутнасці ў трохфазным ланцугу

Рэактыўную магутнасць у ланцугу трохфазнага току пры сіметрычнай нагрузцы можна вымераць з дапамогай аднаго аднафазнага ватметра актыўнай магутнасці, калі ўключыць яго ў ланцуг, як паказана на рыс. 3.34, *а*. Пры гэтым паслядоўная абмотка ватметра ўключаецца ў разрыў лінейнага проваду А, В або С, а паралельная — адпаведна пад лінейнае напружанне U_{BC}, U_{CA}, U_{AB}. Для вызначэння рэактыўнай магутнасці трохфазнай сістэмы трэба паказанне ватметра памножыць на $\sqrt{3}$.

Сапраўды, няхай ток адстае ад фазнага напружання на вугал φ (рыс. 3.34, *б*), тады зрух фаз паміж фазным напружаннем U_A і лінейным U_{BC} роўны 90°, а зрух фаз паміж фазным (лінейным) токам I_A і лінейным напружаннем U_{BC} роўны $90° - \varphi$. Такім чынам, пры ўключэнні токавай абмоткі ватметра ў фазу *A*, а абмоткі напружання пад лінейнае напружанне U_{BC} ватметр пакажа магутнасць



Рыс. 3.34. Вымярэнне рэактыўнай магутнасці пры сіметрычнай нагрузцы: *а* — схема ўключэння ватметра; *б* — вектарная дыяграма

$$Q_W = I_A U_{BC} \cos(90° - \varphi) = I_A U_{BC} \sin\varphi .$$

Параўнаем гэтую формулу з формулай рэактыўнай магутнасці трохфазнай сістэмы ($Q = \sqrt{3}\, I_л U_л \sin\varphi$). Зазначым, што паказанне ватметра, памножанае на $\sqrt{3}$, адпавядае рэактыўнай магутнасці трохфазнай сістэмы:

$$Q = \sqrt{3}\, I_л U_л \sin\varphi = \sqrt{3}\, Q_W . \qquad (3.14)$$

Рэактыўная магутнасць трохфазнай сістэмы пры сіметрычнай нагрузцы можа быць вымерана таксама метадам двух ватметраў, уключаных для вымярэння актыўнай магутнасці.

Пры гэтым

$$P_1 - P_2 = IU\,[\cos(30° - \varphi) - \cos(30° + \varphi)] =$$

$$= 2IU \sin 30° \sin\varphi = IU \sin\varphi .$$

Памножым рознасць паказанняў ватметраў на $\sqrt{3}$, атрымаем рэактыўную магутнасць трохфазнай сістэмы:

$$Q = \sqrt{3}\,(P_1 - P_2) = \sqrt{3}\, IU \sin\varphi .$$

Пры несіметрычнай нагрузцы фаз трохфазнай сістэмы рэактыўная магутнасць вызначаецца па суме паказанняў трох ватметраў (рыс. 3.35):

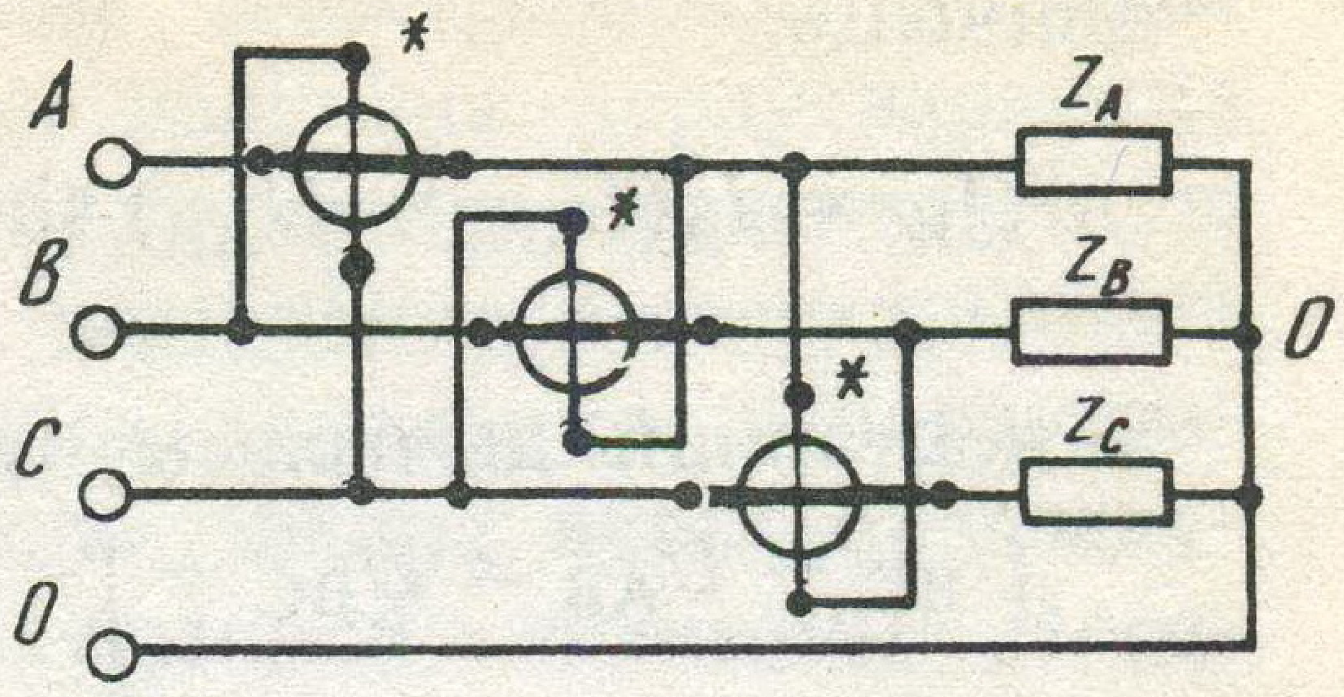
$$Q_W = I_A U_{BC} \cos(90° - \varphi_A) + I_B U_{CA} \cos(90° - \varphi_B) +$$

$$+ I_C U_{AB} \cos(90° - \varphi_C) . \qquad (3.15)$$

Паколькі трохфазная сістэма напружанняў сіметрычная, атрымаем

$$Q_W = I_A U \sin \varphi_A +$$

$$+ I_B U \sin \varphi_B + I_C U \sin \varphi_C .$$

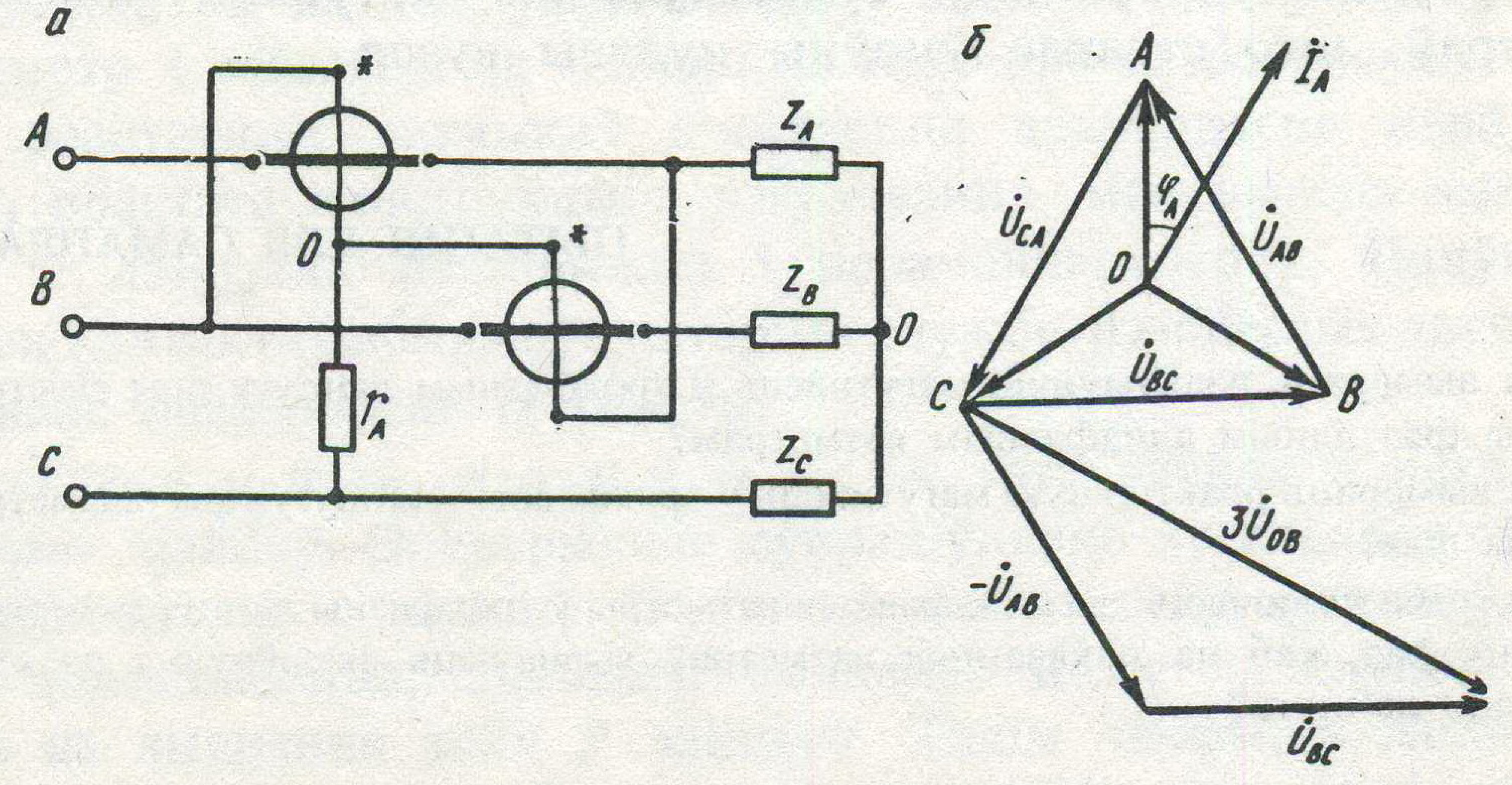


Рыс. 3.35. Схема ўключэння ватметраў для вымярэння рэактыўнай магутнасці

Пры параўнанні гэтай формулы рэактыўнай магутнасці з формулай (3.14) рэактыўнай магутнасці трохфазнай сістэмы заўважаем, што калі падзелім суму паказанняў трох ватметраў на $\sqrt{3}$, атрымаем рэактыўную магутнасць трохфазнай сістэмы:

$$Q = \frac{Q_W}{\sqrt{3}} = (I_A U \sin \varphi_A + I_B U \sin \varphi_B + I_C U \sin \varphi_C) : \sqrt{3} .$$

Шырокае прымяненне ў практыцы вымярэння рэактыўнай магутнасці ў трохфазнай сістэме пры несіметрычнай нагрузцы атрымаў метад двух ватметраў, уключаных у ланцуг, як паказана на рыс. 3.36, *а*. У трохправадным трохфазным ланцугу пры такім



Рыс. 3.36. Вымярэнне рэактыўнай магутнасці метадам двух ватметраў: а — схема ўключэння; б — вектарная дыяграма

уключэнні ток свабоднай фазы $I_C = -I_A - I_B$, бо $I_A + I_B + I_C = 0$. Формула рэактыўнай магутнасці (3.15) у такім выпадку запішацца так:

$$Q_W = I_A U_{BC} \sin \varphi_A + I_B U_{CA} \sin \varphi_B -$$

$$-I_A U_{AB} \sin \varphi_A - I_B U_{AB} \sin \varphi_B .$$

Значыць,

$$Q_W = I_A(U_{BC} - U_{AB})\sin\varphi_A + I_B(U_{CA} - U_{AB})\sin\varphi_B\,.$$

З вектарнай дыяграмы (рыс. 3.36, *б*) вынікае:

$$U_{BC} - U_{AB} = U_{BC} + (-U_{AB}) = 3U_{0B}$$

$$U_{CA} - U_{AB} = U_{CA} + (-U_{AB}) = 3U_{0A}\,.$$

Такім чынам, $Q_W = 3(I_A U_{0B}\sin\varphi_A + I_B U_{0A}\sin\varphi_B)$.

Для атрымання рэактыўнай магутнасці трохфазнай сістэмы трэба падзяліць гэту формулу на $\sqrt{3}$ адпаведна зыходнай формуле (3.15):

$$Q = \frac{Q_W}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}(I_A U_{0B}\sin\varphi_A + I_B U_{0A}\sin\varphi_B) = \sqrt{3}(Q_1 + Q_2)\,,$$

што адпавядае суме паказанняў двух ватметраў, памножанай на $\sqrt{3}$.

Дадатковае супраціўленне $r_д$ у схеме (рыс. 3.36, *а*) павінна быць роўнае ўнутранаму супраціўленню катушак напружання ватметраў, што стварае ўмоўны нулявы вузел.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як вымераць рэактыўную магутнасць у трохфазным ланцугу пры сіметрычнай нагрузцы фаз адным аднафазным ватметрам?
2. Як вымераць рэактыўную магутнасць у трохфазным ланцугу пры несіметрычнай нагрузцы фаз?
3. Як трэба ўключыць два аднафазныя ватметры ў трохфазны ланцуг з сіметрычнай нагрузкай фаз, каб па паказаннях ватметраў вызначыць актыўную і рэактыўную магутнасць ланцуга?

3.19. Вымярэнне неэлектрычных велічынь электрычным метадам

Электрычны метад вымярэння неэлектрычных велічынь шырока прымяняецца ў сучаснай вытворчасці для кантролю тэхналагічных працэсаў і аўтаматычнага кіравання.

Вымярэнне неэлектрычных велічынь электрычным метадам зводзіцца да таго, што неэлектрычная велічыня пераўтвараецца ў электрычную, вымярэнне якой дае ўяўленне пра неэлектрычную велічыню. Значыць, устройствы для вымярэння неэлектрычных велічынь электрычным метадам павінны складацца з пераўтваральніка і электравымяральнага прыбора, шкала якога праградуявана ў адзінках вымернай неэлектрычнай велічыні. Пераўтваральнікі неэлектрычных велічынь у электрычныя называюць датчыкамі.

Па прынцыпе дзеяння ўсе электрычныя датчыкі можна падзяліць на дзве групы: параметрычныя і генератарныя. У параметрычных параўтваральніках неэлектрычная велічыня змяняе параметры электрычнага ланцуга (супраціўленне, індуктыўнасць, ёмістасць, частату). Да іх належаць рэастатныя, вугальныя з тэрмасупраціўленнем, электралітныя, ёмістасныя, фотаэлектрычныя і інш.

У рэастатных датчыках становішча паўзунка рэастата ўстанаўліваецца лінейным або вуглавым перамяшчэннем неэлектрычнай велічыні (узроўню вадкасці, ціску пары, механічнай дэфармацыі), што прыводзіць да змянення супраціўлення ланцуга і току ў ім. Па значэнні току мяркуюць аб узроўні вадкасці ў баку, ціску пары ў катле і аб іншых неэлектрычных велічынях. Часта рэастатны датчык уключаецца ў электрычны ланцуг як патэнцыяметр і называецца *патэнцыяметрычным датчыкам*. Вартасцю рэастатных датчыкаў з'яўляецца дакладнасць пераўтварэнняў, прастата канструкцыі і рэгулявання, магчымасць выкарыстання ў ланцугах пастаяннага і пераменнага току. Наяўнасць рухомых кантактаў абмяжоўвае тэрмін службы рэастатных датчыкаў і пагаршае надзейнасць іх работы.

Вугальны датчык — гэта слупок з некалькіх вугальных шайбаў. Электрычнае супраціўленне вугальнага слупка залежыць ад яго сціскання. З павелічэннем ціску супраціўленне слупка памяншаецца. Значыць, змяненне ціску на слупок прыводзіць да змянення току ў ланцугу. Такім чынам, з дапамогай электравымяральнага прыбора можна вымераць сілу ціску на вугальны слупок, які створаны ціскам пары, змяненнем узроўню вадкасці, дэфармацыяй цвёрдых цел і г. д. Недахопам вугальных датчыкаў з'яўляецца залежнасць іх супраціўлення ад тэмпературы і наяўнасць гістэрэзіса.

Датчыкі з тэрмасупраціўленнем прымяняюцца для вымярэння хуткасці патоку вадкасці і газу, ступені разрэджанасці газаў і служаць газааналізатарамі. У іх выкарыстоўваецца ўласцівасць металічнага праваднікa змяняць супраціўленне ў залежнасці ад тэмпературы. Неэлектрычныя велічыні

вымяраюцца па ступені ахалоджвання тэрмасупраціўлення і змяненню яго электрычнага супраціўлення.

Тэрмасупраціўленні робяцца з металаў, якія маюць вялікі дадатны тэмпературны каэфіцыент супраціўлення (плаціна, нікель, медзь). У практыцы шырока выкарыстоўваюцца паўправадніковыя тэрмасупраціўленні, якія маюць вялікі адмоўны каэфіцыент супраціўлення. Яны называюцца *тэрмістарамі.* Тэрмістары ў параўнанні в тэрмасупраціўленнямі болей адчувальныя і менш інерцыйныя.

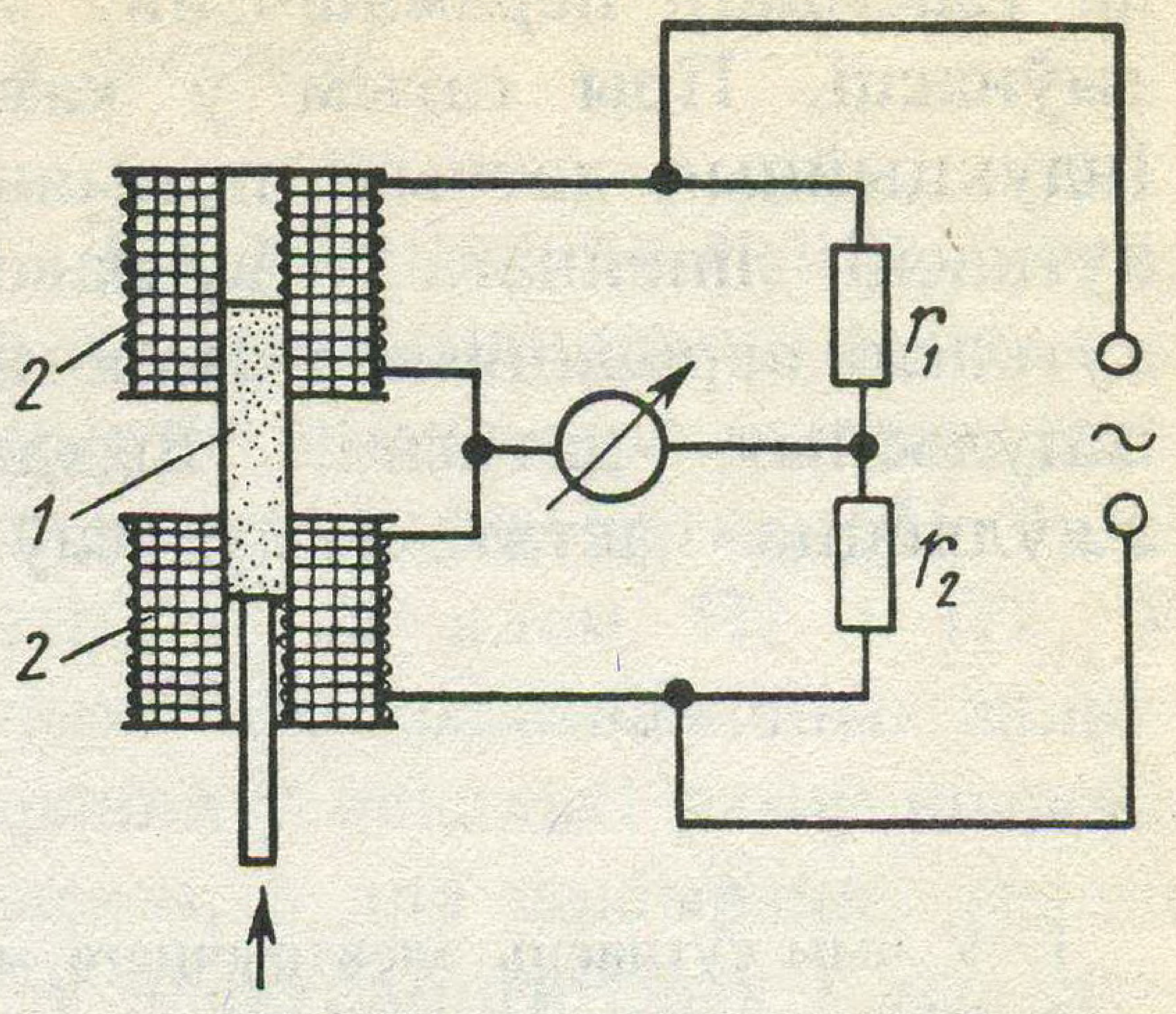
У электралітных датчыках выкарыстоўваецца залежнасць супраціўленняў электраліту ад яго канцэнтрацыі. Прымяняюцца яны для колькаснага аналізу раствораў. Каб пазбегнуць электролізу раствораў у час вымярэння, электралітныя датчыкі жывяцца пераменным токам.

У магнітапругкіх датчыках выкарыстоўваецца залежнасць магнітнай пранікальнасці ферамагнітных матэрыялаў ад механічных напружанняў, якія дзейнічаюць на стрыжань — магнітапругкі эфект. Магнітапругкі датчык складаецца з трохстрыжневага магнітаправода. На сярэднім стрыжні знаходзіцца катушка індуктыўнасці. Сцісканне магнітаправоду прыводзіць да змянення яго намагнічвання, а значыць і электрычнага супраціўлення катушкі. Матэрыялам для магнітапругкіх датчыкаў з'яўляюцца некаторыя гатункі пермалою і трансфарматарная сталь, якая мае найбольшую магнітную адчувальнасць да ціску. Магнітапругкія датчыкі прымяняюцца для вымярэння статычных і пераменных нагрузак.

У аснову работы ёмістасных датчыкаў пакладзена змяненне ёмістасці датчыка пад дзеяннем вымернай неэлектрычнай велічыні (ціску, механічнага перамяшчэння, вугла павароту, вільготнасці і г. д.). Паколькі ёмістасць кандэнсатара залежыць ад трох параметраў — плошчы абкладак, адлегласці паміж абкладкамі і дыэлектрычнай пранікальнасці асяроддзя, ёмістасныя датчыкі бываюць трох тыпаў. Ёмістасныя датчыкі маюць вельмі высокую адчувальнасць.

Індуктыўныя датчыкі складаюцца з ферамагнітнага стрыжня і катушкі індуктыўнасці. Работа індуктыўнага датчыка заснавана на змяненні індуктыўнасці катушкі шляхам перамяшчэння ў ёй стрыжня або змянення паветранага зазору ў стрыжні. Індуктыўныя датчыкі прымяняюцца для вымярэння хуткасці лінейных і вуглавых перамяшчэнняў, дэфармацыі. Хібнасць індуктыўных датчыкаў абумоўліваецца ў асноўным нестабільнасцю амплітуды пераменнага току і змяненнем тэмпературы асяроддзя. Больш адчувальнымі з'яўляюцца дыферэнцыяльныя індуктыўныя

датчыкі (рыс. 3.37), якія маюць дзве катушкі *2* і адзін жалезны стрыжань *1*, размешчаны сіметрычна катушкам. Пад дзеяннем неэлектрычнай велічыні стрыжань перамяшчаецца ўнутры катушак, што прыводзіць да змянення індуктыўнага супраціўлення абедзвюх катушак і ўзнікнення току ў электравымяральным прыборы. Дыферэнцыяльныя індуктыўныя датчыкі шырока прымяняюцца ў маставых схемах для вымярэння ціску, дэфармацыі і механічных перамяшчэнняў.



Рыс. 3.37. Схема дыферэнцыяльнага індуктыўнага датчыка

Ф о т а э л е к т р ы ч н ы я   д а т ч ы к і бываюць двух тыпаў: фотаэлементы са знешнім і фотаэлементы з унутраным фотаэфектам.

Генератарныя пераўтваральнікі (датчыкі) — гэта датчыкі, у якіх неэлектрычныя велічыні пераўтвараюцца ў ЭРС. Да іх адносяцца тэрмаэлектрычныя, п'езаэлектрычныя, індукцыйныя і фотаэлектрычныя з унутраным фотаэфектам.

Т э р м а э л е к т р ы ч н ы   д а т ч ы к — гэта тэрмапара, у якой рознасць тэмператур спаю і свабодных канцоў стварае ЭРС тэрмапары. Калі падтрымліваць тэмпературу свабодных канцоў пастаяннай, то па значэнні ЭРС тэрмапары можна меркаваць аб тэмпературы спаю, значыць, электравымяральным прыборам вымераць тэмпературу ў месцы спаю. ЭРС тэрмапары залежыць ад пары матэрыялаў, з якіх яна зроблена. Матэрыялам для тэрмапар служаць плаціна, крэмній, сурма, медзь, канстантан. Тэрмаэлектрычныя датчыкі даюць магчымасць вымераць тэмпературу звыш 2000 °С.

У   п ' е з а э л е к т р ы ч н ы х   д а т ч ы к а х выкарыстоўваецца п'езаэлектрычны эфект, які заключаецца ў тым, што пры дзеянні механічнай сілы на крышталь турмаліну, кварцу, сегнетавай солі і тытану барыю ў напрамку электрычнай восі на гранях узнікаюць электрычныя зарады, з'яўляецца ЭРС. П'езаэлектрычныя датчыкі малаінерцыйныя і прымяняюцца для даследавання хутказменлівага ціску.

І н д у к ц ы й н ы я   д а т ч ы к і складаюцца з магнітнага стрыжня і адной або дзвюх катушак індуктыўнасці. Прынцып работы індукцыйных датчыкаў заключаецца ў тым, што неэлектрычныя велічынні якім-небудзь спосабам прыводзяць

да ўзаемнага перамяшчэння магнітнага стрыжня і катушкі індуктыўнасці. Пры гэтым у катушцы ўзбуджаецца ЭРС індукцыі. Індукцыйныя датчыкі прымяняюцца ў асноўным для вымярэння хуткасці лінейнага і вуглавога перамяшчэння. Для вымярэння хуткасці вярчэння або зваротна-паступальнага руху прымяняюцца імпульсныя датчыкі. Выхадной велічынёй такіх датчыкаў з'яўляецца частата імпульсаў.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. У чым сутнасць электрычнага метаду вымярэння неэлектрычных велічынь?
2. Што называецца датчыкам і для чаго ён служыць?
3. Як падзяляюцца датчыкі па прынцыпе дзеяння?
4. Назавіце параметрычныя датчыкі і растлумачце прынцып іх работы.
5. Растлумачце ўстройства і прынцып работы дыферэнцыяльнага індуктыўнага датчыка.
6. Назавіце генератарныя датчыкі і растлумачце прынцып іх работы.
7. Скажыце, дзе практычна прымяняецца электрычны метад вымярэння неэлектрычных велічынь.

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 4

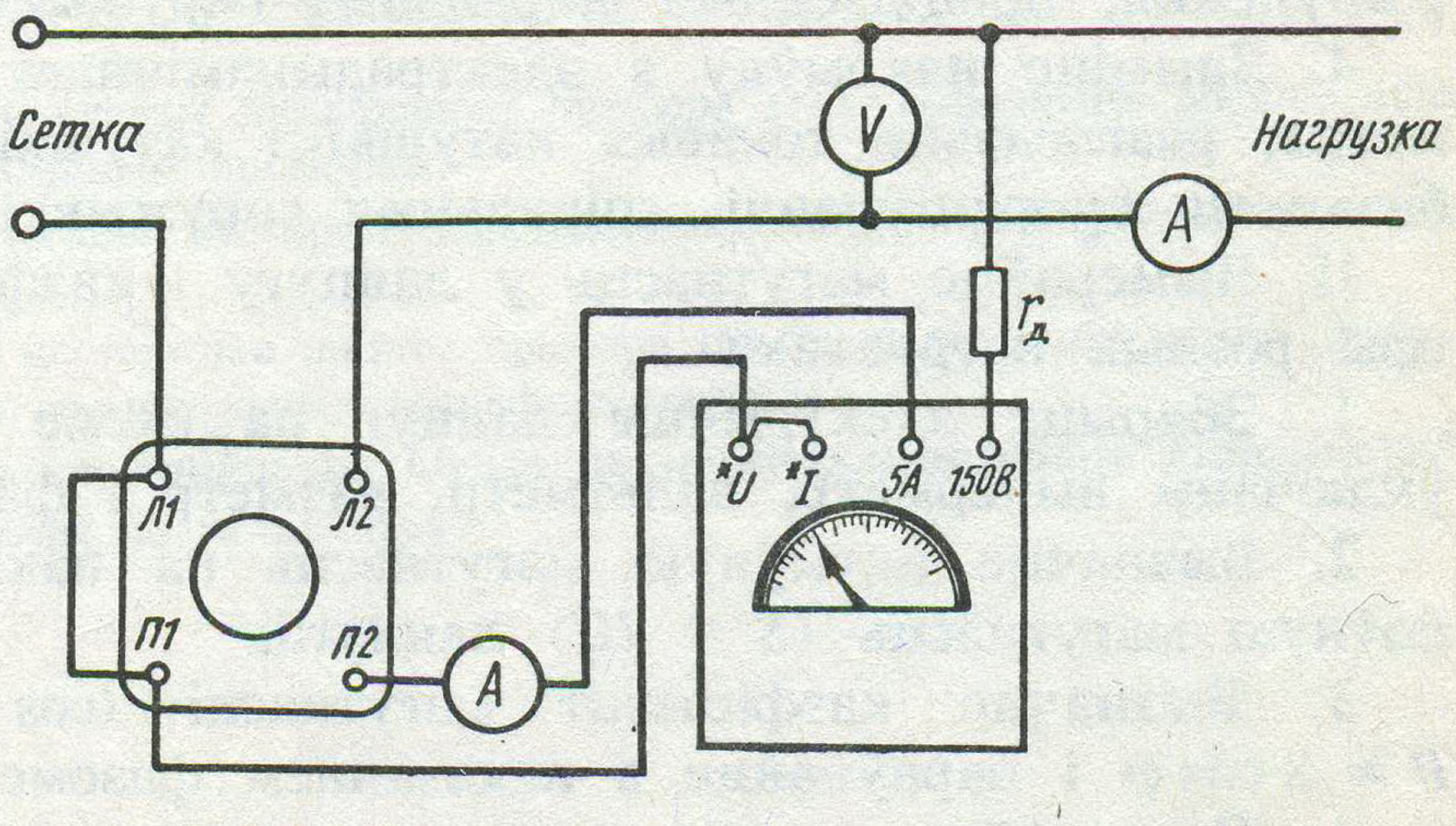
Вывучэнне электравымяральных прыбораў. Вымярэнне магутнасці ватметрам з выкарыстаннем дабавачнага супраціўлення і вымяральнага трансфарматара

Мэта работы: вывучыць устройства і прынцып дзеяння электравымяральных прыбораў магнітаэлектрычнай, электрамагнітнай і электрадынамічнай сістэм; навучыцца ўключаць прыборы ў ланцуг і вымяраць электрычныя велічыні.

У выніку выканання лабараторнай работы студэнт павінен вывучыць устройства магнітаэлектрычных і электрамагнітных амперметраў і вальтметраў, аднафазнага электрадынамічнага ватметра, набыць уменні і навыкі ўключэння ў ланцуг прыбораў з шунтом, дабавачным супраціўленнем, трансфарматарам току і вымярэння электрычных велічынь.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 3.2—3.8 падручніка. Для пашырэння граніц вымярэння ў магнітаэлектрычных амперметрах прымяняецца шунт, а ў электрамагнітных і электрадынамічных — вымяральныя трансфарматары току. У разрыў ланцуга падключаюцца клемы Л1 і Л2 трансфарматара току, а амперметр — да клем П1 і П2. У магнітаэлектрычных, электрамагнітных і электрадынамічных вальтметрах для пашырэння граніц вымярэння ў некалькі разоў шырока прымяняюцца дабавачныя супраціўленні, а для пашырэння граніц вымярэння ў дзесяткі і сотні разоў у электрамагнітных і электрадынамічных вальтметрах прымяняюцца вымяральныя трансфарматары напружання. У ватметрах для пашырэння граніц вымярэння ў ланцугу катушкі току прымяняецца вымяральны трансфарматар току, а ў ланцугу катушкі напружання — дабавачнае супраціўленне або вымяральны трансфарматар напружання (рыс. 3.38).



Рыс. 3.38. Схема ўключэння ватметра ў ланцуг з дапамогай трансфарматара току *1* дабавачнага супраціўлення

Пры прымяненні шунтоў і дабавачных супраціўленняў пастаянная прыбора павялічваецца ў n разоў. Пры прымяненні вымяральных трансфарматараў току і напружання пастаянная прыбора павялічваецца ў k разоў. Каэфіцыент трансфармацыі вымяральнага трансфарматара вызначаецца па формулах: $k = I_1/I_2$ і $k = U_1/U_2$.

Пры падключэнні ватметра ў ланцуг з трансфарматарам току і дабавачным супраціўленнем пастаянная ватметра павялічваецца ў kn разоў, $C = knC_0$, дзе C_0 — пастаянная ватметра пры непасрэдным уключэнні яго ў ланцуг.

У лабараторнай практыцы шырока прымяняюцца вымяральныя трансфарматары току тыпу УТТ-5, разлічаныя на другасны ток 5 А і першасныя токі 15—50—100—150—200—300—600 А. Для першасных токаў на 100—150—200—300—600 А робіцца першасная

абмотка ў 6—4—3—2—1 віткоў праз дзірку ў трансфарматары і ўключаецца ў разрыў ланцуга.

З а ў в а г а. Пры праходжанні току па першаснай абмотцы (Л1 і Л2) другасную абмотку (П1 і П2) размыкаць забараняецца. Пры падключэнні вымяральных прыбораў другасную абмотку трэба замкнуць накаратка.

Выкананне работы

I. Вывучыце магнітаэлектрычныя, электрамагнітныя і электрадынамічныя прыборы.

1. Вывучыце ўсе абазначэнні на амперметрах, вальтметрах і ватметрах.

2. Здыміце накрыўку з магнітаэлектрычнага амперметра, разгледзьце форму і полюсы пастаяннага магніта, катушку, спіральныя спружынкі, карэктар.

3. Здыміце накрыўку з электрамагнітнага вальтметра, разгледзьце форму стрыжня, токавую катушку, катушку дабавачнага супраціўлення, процідзейныя спіральныя спружыны.

4. Здыміце накрыўку з электрадынамічнага аднафазнага ватметра, разгледзьце токавыя катушкі і катушкі напружання, дабавачныя супраціўленні, спіральныя спружынкі, карэктар.

II. Вымерайце магутнасць у ланцугу і каэфіцыент магутнасці пры розных нагрузках.

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 3.39, у які ўключаны амперметр, вальтметр, ватметр і фазометр.

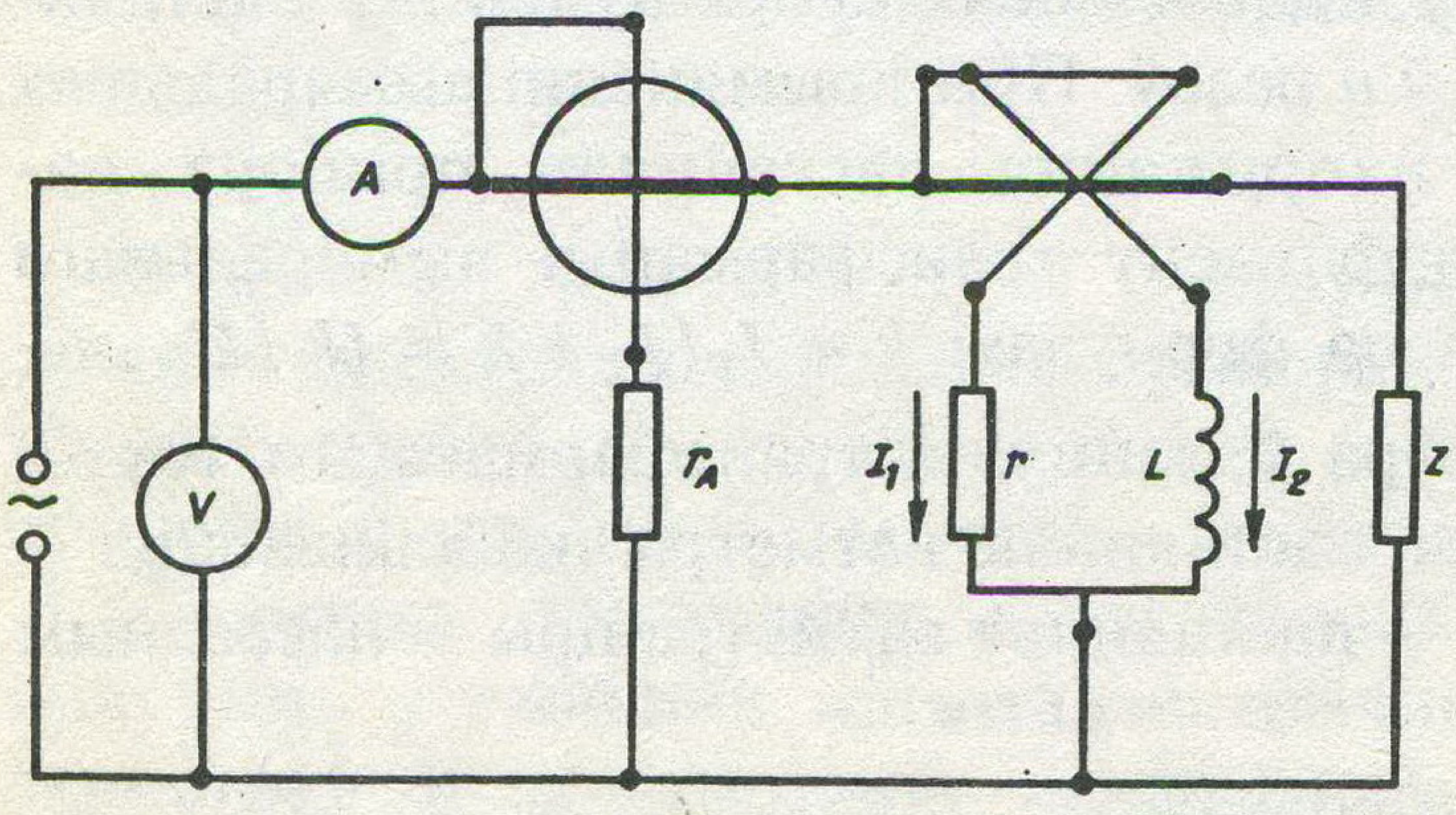
2. Вызначце актыўную магутнасць па паказанні ватметра і поўную магутнасць ($S = IU$) ланцуга.

3. Вызначце каэфіцыент магутнасці ($\cos \varphi$) з формулы $P = S \cos \varphi$ і параўнайце з паказаннем фазометра.

4. Паслядоўна з рэастатам падключыце абмотку школьнага трансфарматара на 12 В з магнітапроводам і вызначце $\cos \varphi$ для гэтага ланцуга.

5. Параўнайце значэнне $\cos \varphi$ з паказаннем фазометра. Даныя доследа запішыце ў табл. 1.

III. Вымерайце магутнасць ватметрам з выкарыстаннем трансфарматара току і дабавачнага супраціўлення.



Рыс. 3.39. Схема ўключэння ў ланцуг амперметра, вальтметра, ватметра і фазометра

Т а б л і ц а 1

Вымярэнні					Вылічэнні	
Выгляд нагрузкі	Паказанні фазометра	P_1, Вт	I, А	U, В	S, В·А	$\cos\varphi$

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 3.38, у якасці крыніцы току вазьміце ЛАТр, а нагрузкі — рэастат 25—30 Ом, 10 А.

2. Вымерайце магутнасць ланцуга пры напружанні 200 В і сіле току 6—10 А.

3. Параўнайце паказанне ватметра ($P = knC_0N$, дзе N — лік дзяленняў шкалы) з магутнасцю, вылічанай па формуле $P = IU$.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Якая роля спіральных спружынак у магнітаэлектрычных і электрамагнітных прыборах?

2. Што называецца класам дакладнасці прыбора і як вызначыць абсалютную хібнасць вымярэння дадзеным прыборам?

3. Якія існуюць спосабы засцярогі электравымяральных прыбораў ад знешніх магнітных палёў?

4. Як вызначаецца пастаянная шкалы прыбора пры выкарыстанні шунта, дабавачнага супраціўлення, вымяральных трансфарматараў?

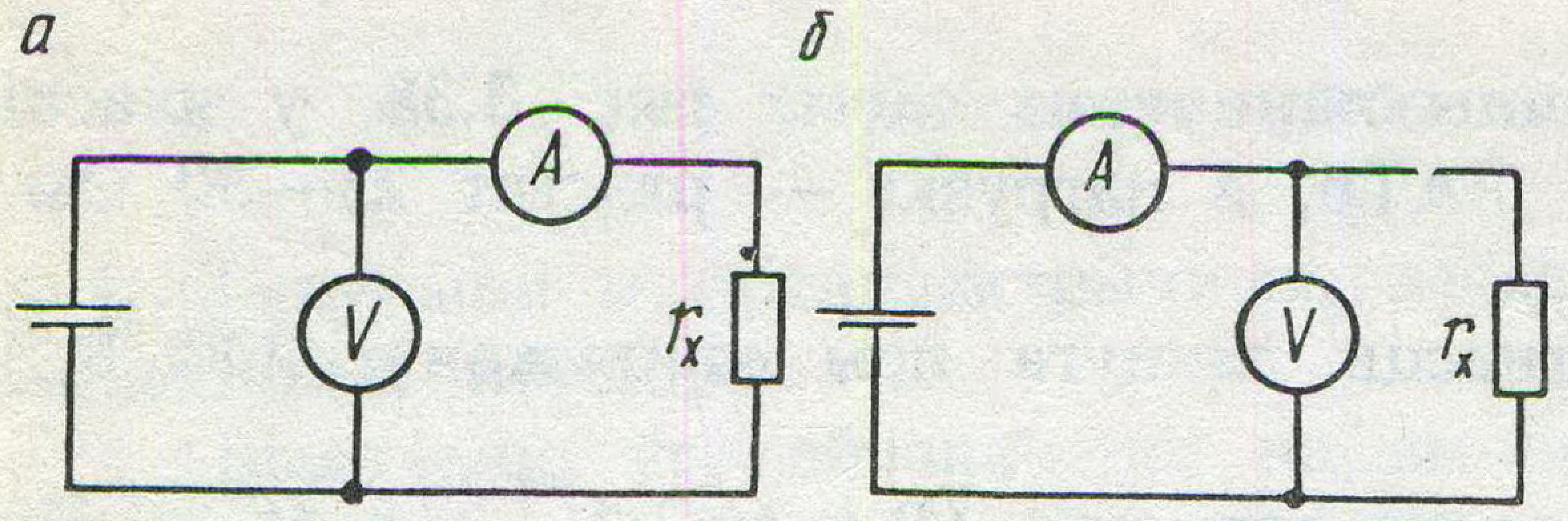
5. Як разлічваецца супраціўленне шунта да магнітаэлектрычнага амперметра? Дабавачнае супраціўленне да вальтметра?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Вымярэнне супраціўленняў

М э т а р а б о т ы: вывучыць прыборы для вымярэння супраціўленняў і навучыцца вымяраць супраціўленні ў ланцугах пастаяннага і пераменнага току. У выніку выканання лабараторнай работы студэнт павінен навучыцца вымяраць супраціўленне амперметрам, вальтметрам, омметрам і мегаомметрам. Вывучыць авометр АВО-63, камбінаваны электравымяральны прыбор 43101, прыбор камбінаваны лічбавы ШЧ 4300 і навучыцца вымяраць імі супраціўленні.

Вывучыце § 3.11—3.13 падручніка. Амічнае супраціўленне ў ланцугах пастаяннага току можна вымераць з дапамогаю амперметра і вальтметра (рыс. 3.40, *а*). У першым выпадку (рыс. 3.40, *а*)



Рыс. 3.40. Схема ўключэння амперметра і вальтметра для вымярэння супраціўлення

супраціўленне можна вызначыць па раўнанні $r = U/I = r_x + r_A$, дзе r_A — супраціўленне амперметра. Чым меншае гэта супраціўленне ў параўнанні в r_x, тым дакладней будзе вынік. У другім выпадку (рыс. 3.40, *б*) r_x вызначаецца паводле закону паралельнага злучэння супраціўленняў:

$$r = r_x r_V / (r_x + r_V),$$

дзе r_V — супраціўленне вальтметра; r вызначаецца па паказанні прыбораў ($r = U/I$).

Калі $r_V \to \infty$, то $r_x \to r$, што відавочна з папярэдняй роўнасці. У ланцугах пераменнага току з дапамогаю амперметра і вальтметра вымяраецца модуль поўнага супраціўлення, які з'яўляецца геаметрычнай сумай актыўнага і рэактыўнага супраціўленняў:

$$z = U/I = \sqrt{(r^2 + x^2)}.$$

Для вымярэння актыўнага супраціўлення карыстаюцца формулай магутнасці $P = I^2 r$, адкуль $r = P/I^2$. Значыць, актыўнае супраціўленне можна вымераць з дапамогай ватметра і амперметра. Рэактыўнае супраціўленне можна вылічыць з суадносіны $x = \sqrt{z^2 - r^2}$.

У лабараторнай практыцы для вымярэння амічных супраціўленняў прымяняюцца омметры М-371 і М-471, а таксама лагаметрычныя омметры і мегаомметры.

У практыцы радыёмайстраў і настаўнікаў фізікі шырока прымяняюцца авометр тыпу АВО-63, прыбор электравымяральны камбінаваны 43101 і прыбор камбінаваны лічбавы ШЧ 4300.

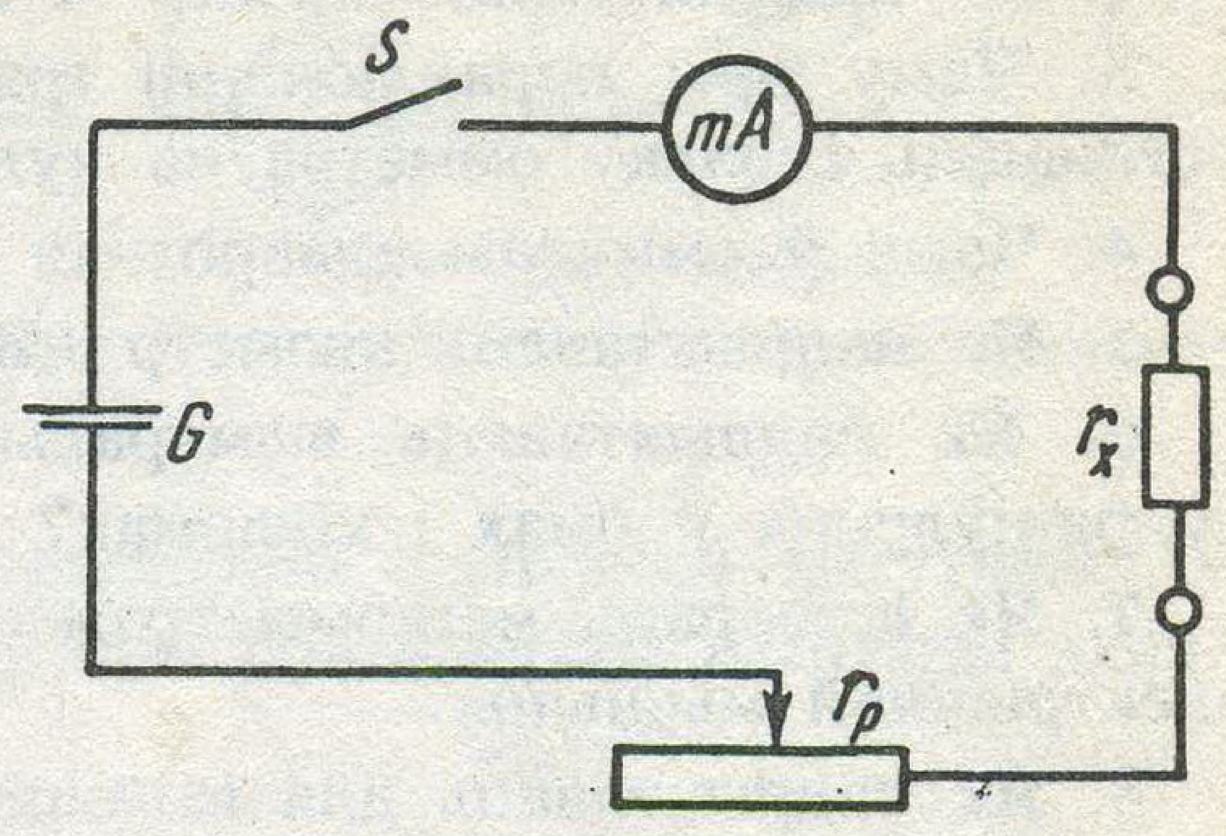
Выкананне работы

1. Праградуіруйце шкалу магнітаэлектрычнага міліамперметра ў омах:

а) збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 3.41;

б) устанавіце карэктарам стрэлку прыбора на нуль шкалы, калі ў гэтым ёсць неабходнасць;

в) увядзіце поўнасцю рэгулявальны рэастат r_p, замкніце накаратка клемы r_x і памяншайце супраціўленне рэгулявальнага рэастата, устанавіце стрэлку прыбора ў крайняе правае становішча шкалы, што адпавядае знешняму супраціўленню, роўнаму нулю ($r_x = 0$);



Рыс. 3.41. Схема градуявання шкалы міліамперметра ў омах

г) падключыце да клем r_x розныя вядомыя супраціўленні (магазін супраціўленняў) і праградуіруйце шкалу прыбора ў омах. Даныя вымярэння запішыце ў табл. 1:

Табліца 1

Вымерныя велічыні	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
n																
r_x, Ом																

д) начарціце градуявальную крывую $r = f(n)$.

2. Праградуяваным прыборам (омметрам) вымерайце 2— 3 супраціўленні.

3. Вывучыце ўстройства і прынцып работы омметра М-371 і вымерайце 2—3 супраціўленні.

4. Вывучыце ўстройства і прынцып работы мегаомметра і вымерайце супраціўленне ізаляцыі кабелю, правада, электрычнай машыны або апарата.

5. Вывучыце ўстройства і прынцып работы авометра АВО-63 і вымерайце 2—3 розныя супраціўленні ў омах і кілаомах.

6. Вывучыце ўстройства і прынцып работы камбінаванага электравымяральнага прыбора 43101 і вымерайце 2—3 розныя супраціўленні.

7. Вывучыце ўстройства і прынцып работы прыбора камбінаванага лічбавага ШЧ 4300 і вымерайце 2—3 розныя супраціўленні.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. У якім выпадку супраціўленне вымяраецца па схеме 3.40, *а*, а ў якім па схеме 3.40, *б*?
2. Як падрыхтаваць омметр М-371 да работы?
3. Чаму пры пераключэнні граніцы вымярэння супраціўлення трэба паўторна ўстанавіць стрэлку омметра на нуль?
4. Чаму ў омметры адваротная шкала?
5. Як падрыхтаваць авометр АВО-63 для вымярэння супраціўлення?
6. Як падрыхтаваць вымяральны камбінаваны прыбор 43101 для вымярэння супраціўлення ў омах і кілаомах?
7. Як вымераць мегаомметрам супраціўленне ізаляцыі проваду, кабелю, абмоткі электрычнай мышыны?
8. Як падрыхтаваць для вымярэння супраціўлення прыбор камбінаваны лічбавы ШЧ 4300?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Вымярэнне магутнасці ў трохфазных ланцугах

М э т а   р а б о т ы: навучыцца вымяраць актыўную і рэактыўную магутнасці ў трохфазных ланцугах аднафазнымі ватметрамі. У выніку выканання лабараторнай работы студэнт павінен умець вымяраць актыўную і рэактыўную магутнасці ў трохфазных ланцугах пры сіметрычнай і несіметрычнай нагрузках аднафазнымі і трохфазнымі ватметрамі.

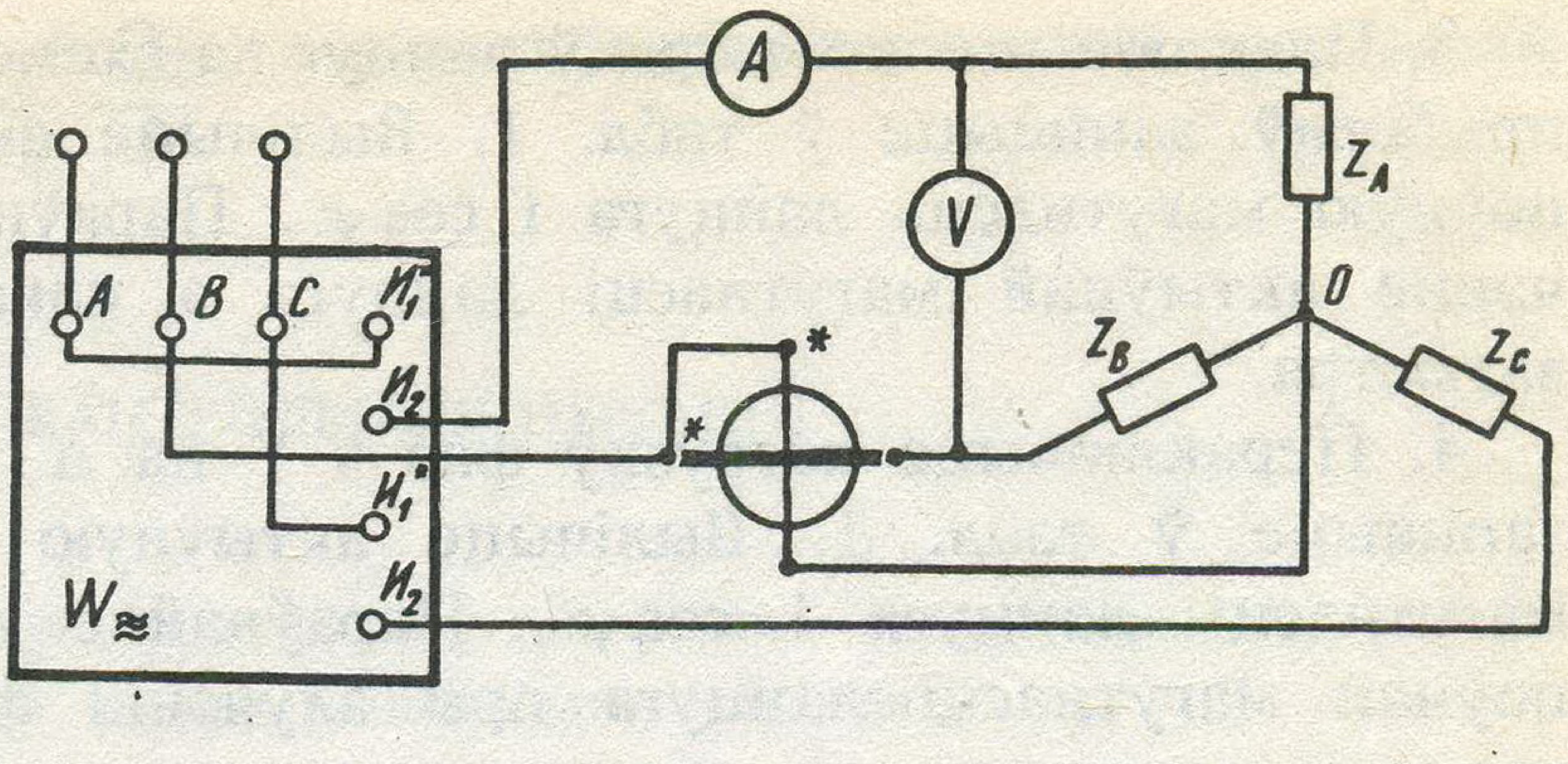
Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 3.17 і 3.18 падручніка.

Выкананне работы

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 3.42. Пажадана мантаж ланцуга пры сіметрычнай нагрузцы фаз выканаць на лабараторным стэндзе. У якасці нагрузкі фаз можна выкарыстаць лямпавы трохфазны рэастат, паўзунковыя рэастаты, катушкі індуктыўнасці (катушкі школьнага трансфарматара або трохфазны трансфарматар). Сіметрычнасць нагрузкі ўстанаўліваецца аднатыпнасцю катушак, стрыжняў і аднолькавым супраціўленнем рэастатаў.

Лямпавы рэастат павінен мець аднолькавыя лямпы. Супраціўленне паўзунковых рэастатаў вымяраецца омметрам і ўстанаўліваецца паўзунком, а сіметрычнасць фазных нагрузак вызначаецца аднолькавай сілай току пры падключэнні ў сетку пераменнага току.



Рыс. 3.42. Схема вымярэння актыўнай магутнасці ў трохфазным ланцугу пры сіметрычнай нагрузцы аднафазным ватметрам

Паказанні аднафазнага і трохфазнага ватметраў, амперметра і вальтметра запішыце ў табл. 1. Вылічыце поўную і актыўную магутнасць ланцуга, $\cos\varphi$. Параўнайце паказанне трохфазнага ватметра з вылічаным значэннем магутнасці ланцуга і зрабіце вывад.

Табліца 1

Спосаб падключэння нагрузкі	Вымярэнні					Вылічэнні		
	P_1, Вт	P_2, Вт	$P_{\approx}$, Вт	$I_л$, А	$U_л$, В	$P_{\approx}$, Вт	$S_{\approx}$, В·А	$\cos\varphi$
Y з даступным нулявым вузлом								
Y з недаступным нулявым вузлом								
Y метадам двух ватметраў								
Пераключэнне з Y на Δ								
Несіметрычная нагрузка								
Актыўная раўнамерная нагрузка								

2. Падключыце ватметр у ланцуг са штучным нулявым вузлом (гл. рыс. 3.32). Трохфазныя ватметр, амперметр і вальтметр захоўваюцца ва ўсіх схемах. Запішыце паказанні прыбораў у табл. 1. Вылічыце актыўную магутнасць, поўную магутнасць ланцуга і $\cos\varphi$. Параўнайце вылічанае значэнне актыўнай магутнасці ланцуга з паказаннем трохфазнага ватметра.

3. Падключыце ватметры ў ланцуг па схеме рыс. 3.33. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1. Вылічыце актыўную магутнасць, поўную магутнасць ланцуга і $\cos\varphi$. Параўнайце вылічанае значэнне актыўнай магутнасці ланцуга з паказаннем трохфазнага ватметра.

4. Пераключыце нагрузку фаз з Y на Δ. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1. Вылічыце актыўную магутнасць, поўную магутнасць ланцуга і $\cos\varphi$. Параўнайце значэнні актыўнай і поўнай магутнасці ланцуга пры злучэнні фаз Y і Δ і зрабіце вывад.

5. Метад двух ватметраў прымяняецца для вымярэння актыўнай магутнасці і пры несіметрычнай нагрузцы фаз. Зрабіце несіметрычную нагрузку фаз, змяняючы супраціўленні рэастатаў або індуктыўнасць катушак трансфарматара. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1. Вылічыце актыўную магутнасць ланцуга і параўнайце яе з паказаннем трохфазнага ватметра.

6. Зрабіце раўнамерную актыўную нагрузку фаз (адключыце абмоткі трансфарматара). Злучыце фазныя нагрузкі Y або Δ і ўключыце адзін аднафазны ватметр. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1. Вылічыце актыўную і поўную магутнасці ланцуга і $\cos\varphi$. Параўнайце вылічанае значэнне актыўнай магутнасці ланцуга з паказаннем трохфазнага ватметра і зрабіце вывад.

7. Падключыце аднафазны ватметр у ланцуг для вымярэння рэактыўнай магутнасці ланцуга па схеме рыс. 3.34. У якасці рэактыўнай нагрузкі фаз можна выкарыстаць трохфазны трансфарматар або тры школьныя трансфарматары (катушкі на 220 В з замкнутымі магнітапровадамі). Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2. Вылічыце рэактыўную і поўную. магутнасці ланцуга, $\cos\varphi$. Параўнайце актыўную магутнасць ланцуга з паказаннем трохфазнага ватметра і зрабіце вывад.

Табліца 2

Спосаб падключэння нагрузкі	Вымярэнні				Вылічэнні			
	Q_1, ВАр	Q_2, ВАр	$I_л$, А	$U_л$, В	$P_{\approx}$, Вт	$Q_{\approx}$, ВАр	$S_{\approx}$, В·А	$\cos\varphi$
Y								

8. Падключыце два аднафазныя ватметры ў трохфазны ланцуг па схеме рыс. 3.36. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2. Вылічыце рэактыўную і поўную магутнасці ланцуга, $\cos\varphi$. Параўнайце значэнні рэактыўнай магутнасці ланцуга па паказаннях

прыбораў ($Q = \sqrt{3}(Q_1 + Q_2)$) з рэактыўнай магутнасцю, вылічанай па формуле $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Як вымераць актыўную магутнасць у трохфазным ланцугу пры сіметрычнай нагрузцы фаз з дапамогай аднаго аднафазнага ватметра?

2. Калі прымяняецца метад двух ватметраў для вымярэння актыўнай магутнасці ланцуга?

3. Колькі трэба аднафазных ватметраў, каб вымераць актыўную магутнасць у чатырохправадным трохфазным ланцугу з несіметрычнай нагрузкай фаз?

4. У якім выпадку магутнасць трохфазнага ланцуга вызначаецца памнажэннем паказання аднафазнага ватметра на два і на тры?

5. Па паказаннях якіх прыбораў вызначаецца $\cos\varphi$?

6. Як зменяцца паказанні ватметраў пры пераключэнні нагрузкі фаз з Y на Δ?

7. Як вымераць рэактыўную магутнасць ланцуга пры сіметрычнай нагрузцы фаз?

8. Як вымераць рэактыўную магутнасць ланцуга пры несіметрычнай нагрузцы фаз?

9. У якіх сетках трохфазнага току прымяняюцца двухэлементныя, а ў якіх трохэлементныя трохфазныя ватметры?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 7

Вывучэнне індукцыйнага лічыльніка электрычнай энергіі

М э т а р а б о т ы: вывучыць устройства і прынцып работы індукцыйнага лічыльніка, навучыцца ўключаць лічыльнік у ланцуг і вымяраць электраэнергію.

Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен вывучыць устройства і прызначэнне асноўных частак індукцыйнага лічыльніка, умець уключаць аднафазны лічыльнік у ланцуг, праверыць яго на самаход, вызначыць папраўчны каэфіцыент і хібнасць лічыльніка.

Тэарэтычныя звесткі

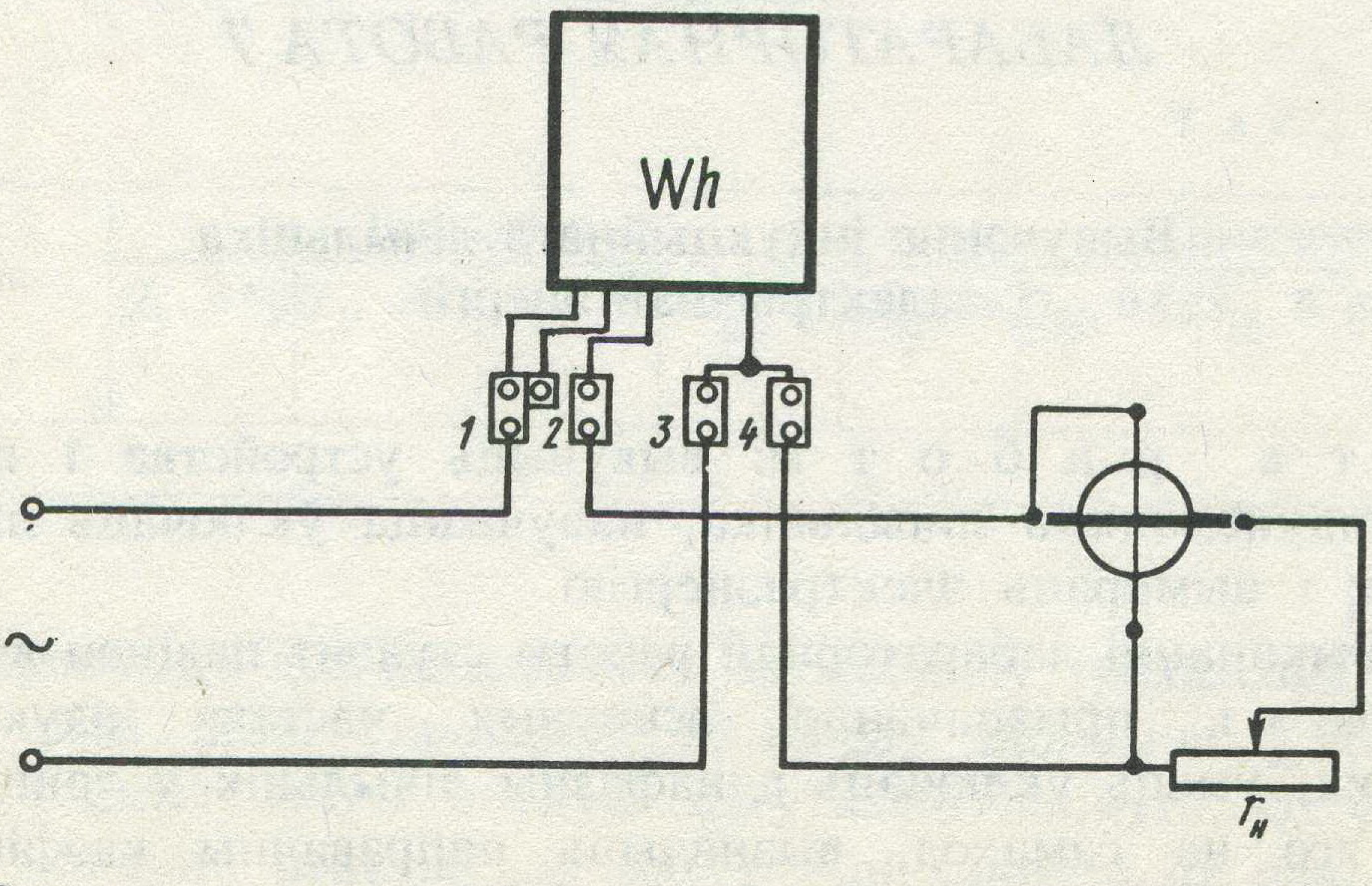
Вывучыце § 3.9 падручніка. Вярчальны момант алюмініевага дыска індукцыйнага лічыльніка прапарцыйны магутнасці $M_в = k_1 P$. Процідзейны момант прапарцыйны здабытку магнітнага патоку пастаяннага магніта і сілы току, якая індуцыруецца гэтым патокам у алюмініевым дыску: $M_{пр} = k'_2 \Phi I$, сіла току прапарцыйна хуткасці вярчэння дыска. Такім чынам,

$$M_{пр} = k''_2 \Phi n . \qquad (1)$$

Пры пастаянным магнітным патоку $M_{пр} = k_2 n$. Пры раўнамерным вярчэнні алюмініевага дыска лічыльніка $M_в = M_{пр}$ або $k_1 P = k_2 n$. Значыць, $P = Cn$. Памножым на час t, атрымаем $Pt = Cnt$ або $W = CN$. Значыць, электраэнергія, якая праходзіць праз лічыльнік і спажываецца прымальнікам, прапарцыйна ліку абаротаў алюмініевага дыска. На пярэднім баку лічыльніка ўказаны значэнні намінальных велічынь: $W_н = C_н N_н$. Намінальная пастаянная лічыльніка ($C_н = W_н / N_н$) вызначаецца па даных лічыльніка. Напрыклад, 1 кВт·гадз. — 1250 абаротаў. Такім чынам,

$$C_н = \frac{36 \cdot 10^5}{1250} = 2880 \; \frac{Вт \cdot с}{аб} .$$

Намінальная пастаянная лічыльніка ўстанаўліваецца на заводзе пры яго стварэнні. Пры рабоце лічыльніка яго паказанні могуць не адпавядаць намінальным даным і сапраўдная пастаянная лічыльніка можа быць больш або менш намінальнай. Для вызначэння сапраўднай пастаяннай лічыльніка $C_с$ збіраюць электрычны ланцуг па схеме рыс. 3.43. Сапраўдная пастаянная



Рыс. 3.43. Схема ўключэння аднафазнага лічыльніка электрычнай энергіі ў ланцуг

вылічаецца па формуле $C_c = Pt/N$, дзе P — магутнасць; t — час работы лічыльніка; N — лік абаротаў алюмініевага дыска. Калі $C_c > C_н$, то гэта значыць, што энергіі выкарыстоўваецца прымальнікам больш, чым паказвае лічыльнік. Такім чынам, патрэбна павялічыць хуткасць вярчэння дыска n, а каб тармазны момант захаваўся ранейшы, адпаведна формуле (1), трэба паменшыць магнітны паток Ф, вывесці пастаянны магніт. І наадварот, пры $C_c < C_н$ — павялічыць магнітны паток.

Адносная хібнасць лічыльніка (%) вызначаецца па формуле $\beta = ((C_н - C_c)/C_н)100$. Калі адносная хібнасць 5 % і больш, то лічыльнік здаецца на праверку і рэгуляванне.

Для дакладных вымярэнняў уводзіцца папраўчны каэфіцыент да паказанняў лічыльніка: $k_п = C_c/C_н$, адсюль $C_c = k_п C_н$. Такім чынам, каб атрымаць сапраўдныя звесткі пра колькасць электраэнергіі, якая прайшла праз лічыльнік, трэба намінальную пастаянную лічыльніка памножыць на папраўчны каэфіцыент і на лік абаротаў дыска. Для такіх лічыльнікаў строяць крывую папраўчных каэфіцыентаў: $k_п = f(n)$.

Выкананне работы

1. Праверце лічыльнік на самаход. Для гэтага падключыце лічыльнік у сетку без нагрузкі.

2. Вылічыце намінальную пастаянную лічыльніка і запішыце ў табл. 1.

3. Зніміце паказанне лічыльніка перад пачаткам работы і запішыце ў табл. 1.

Т а б л і ц а 1

Вымярэнні					Вылічэнні			
P, Вт	t, c	N	$C_н$, Дж /аб	$W_2 - W_1$, Дж/аб	β	k_n	C_c, Дж/аб	W, Дж

4. Збярыце электрычны ланцуг па схеме 3.43. У якасці нагрузкі можна ўзяць лямпавы або паўзунковы рэастат на 5 А.

5. Падключыце электрычны ланцуг у сетку на 5—6 мін і падлічыце колькасць абаротаў алюмініевага дыска за гэты час. Паказанне ватметра, час і лік абаротаў дыска запішыце ў табл. 1. Вылічыце сапраўдную пастаянную лічыльніка. Паўтарыце вымярэнні чатыры разы для розных нагрузак.

6. Вылічыце сярэдняе значэнне C_c і вызначце сярэдняе значэнне хібнасці лічыльніка β.

7. Вылічыце папраўчны каэфіцыент да паказанняў лічыльніка пры розных нагрузках і начарціце крывую папраўчных каэфіцыентаў $k_п = f(n)$, дзе n — лік дзяленняў ватметра (магутнасць электрычнага ланцуга). Вось абсцыс праводзіцца на ўзроўні $k_п = 1$, уверх адкладваюцца значэнні $k_п > 1$, а ўніз — значэнні $k_п < 1$.

8. Зніміце паказанне лічыльніка ў канцы работы і вызначце электрычную энергію, якая прайшла праз лічыльнік за час выканання лабараторнай работы $(W_2 - W_1)$, і сапраўдную электраэнергію з улікам сярэдняга значэння папраўчнага каэфіцыента.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Як ствараецца вярчальны момант алюмініевага дыска лічыльніка і па якой формуле ён вылічваецца?
2. Як ствараецца процідзейны момант алюмініевага дыска і па якой формуле ён вылічваецца?
3. Што называецца самаходам лічыльніка і як яго ўстараніць?
4. Як вызначыць намінальную пастаянную лічыльніка?
5. Як вызначыць сапраўдную пастаянную лічыльніка?
6. Як вызначыць адносную хібнасць лічыльніка?
7. Для чаго служыць папраўчны каэфіцыент і як яго вызначыць?
8. Як падключаецца лічыльнік у сетку?

4

ТРАНСФАРМАТАРЫ

4.1. Аднафазныя трансфарматары

Трансфарматарам называецца статычны электрамагнітны апарат, які служыць для пераўтварэння энергіі пераменнага току аднаго напружання ў энергію пераменнага току другога напружання пры нязменнай частаце току. Трансфарматары шырока выкарыстоўваюцца для перадачы і размеркавання электраэнергіі пераменнага току. Для больш эканамічнай перадачы электраэнергіі на вялікія адлегласці з меншымі стратамі і з большай эканоміяй каляровага металу неабходна перадаваць ток вялікага напружання.

Генератары вырабляюць пераменны ток напружання не больш як 6,3; 10 і 21 кВ. Для перадачы электраэнергіі на вялікія адлегласці пераменны ток пераўтвараецца на трансфарматарных падстанцыях у ток з напружаннем 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750 і 1150 кВ. Прымальнікі электрычнай энергіі (рухавікі, электралямпы) у асноўным разлічаны на напружанне пераменнага току 127; 220; 380; 600 В. Для пераўтварэння току высокага напружання ў ток ніжэйшага напружання будуюцца паніжальныя трансфарматарныя падстанцыі. Часта выкарыстоўваюцца прымальнікі, для сілкавання якіх патрэбны пераменны ток напружаннем 36; 24; 12 і 6 В. Для сілкавання такіх прымальнікаў ад сеткі пераменнага току ў самім прымальніку маецца трансфарматар, які пераўтварае ток сеткавага напружання ў ток патрэбнага напружання.

Трансфарматары, якія павышаюць напружанне пераменнага току, называюцца *павышальнымі,* а якія паніжаюць напружанне пераменнага току, — *паніжальнымі.*

Акрамя сілавых трансфарматараў робяцца трансфарматары спецыяльнага прызначэння (аўтатрансфарматары, зварачныя, вымяральныя і інш.).

Аднафазны трансфарматар прымяняецца ў аднафазным ланцугу пераменнага току. Трансфарматар складаецца са стрыжня і дзвюх або трох абмотак ізаляванага праваду, размешчаных на стрыжні. Абмоткі робяцца ў выглядзе катушак прамавугольнай або круглай формы. Абмотка, якая падключаецца да крыніцы току, называецца *першаснай*, а абмотка, з якой здымаюць напружанне, — *другаснай*. Трансфарматары, у якіх другасная абмотка мае большы лік віткоў, чым першасная, называюцца *павышальнымі*. Трансфарматары, у якіх другасная абмотка мае меншы лік віткоў, чым першасная, называюцца *паніжальнымі*. У трохабмоткавага трансфарматара маюцца дзве другасныя абмоткі, што дае магчымасць атрымаць два розныя напружанні. Стрыжань робіцца з лістоў электратэхнічнай сталі таўшчынёй 0,35 або 0,5 мм і служыць магнітапровадам трансфарматара. Для змяншэння віхравых токаў, а значыць і страты энергіі ў сталі, лісты стрыжня ізалююцца лакам.

У залежнасці ад формы стрыжня аднафазныя трансфарматары бываюць стрыжнявыя і бранявыя. У стрыжнявых трансфарматарах магнітапровад мае форму чатырох замкнутых прамавугольных стрыжняў, а першасныя і другасныя абмоткі надзеты на два стрыжні, прычым палавіна абмоткі — на адным стрыжні, а другая палавіна — на другім. Абмотка з меншым лікам віткоў тоўстага праваду размяшчаецца бліжэй да стрыжня і абазначаецца на схемах НН (ніжэйшае напружанне), зверху на яе намотваецца абмотка з большым лікам віткоў тонкага праваду і абазначаецца на схемах ВН (вышэйшае напружанне). Намотка абмотак на абодвух стрыжнях выконваецца так, каб іх магнітныя патокі складваліся, значыць, калі ў абмотцы на першым стрыжні намотка ідзе па ходу гадзіннікавай стрэлкі, то на другім — супраць яго.

У бранявых трансфарматарах першасная і другасная абмоткі знаходзяцца на сярэднім стрыжні магнітапровада, які разгаліноўваецца і абхоплівае абмоткі. Абмотка бранявога трансфарматара выконваецца так, як і ў стрыжневага, або ў выглядзе дыскавай катушкі, дзе чаргуюцца дыскі вышэйшага і ніжэйшага напружання.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца трансфарматарам?
2. Для чаго прызначаюцца трансфарматары?
3. Які трансфарматар называецца павышальным? Паніжальным?
4. Чаму стрыжань трансфарматара робіцца з ферамагнітнага рэчыва і набіраецца з асобных лістоў?

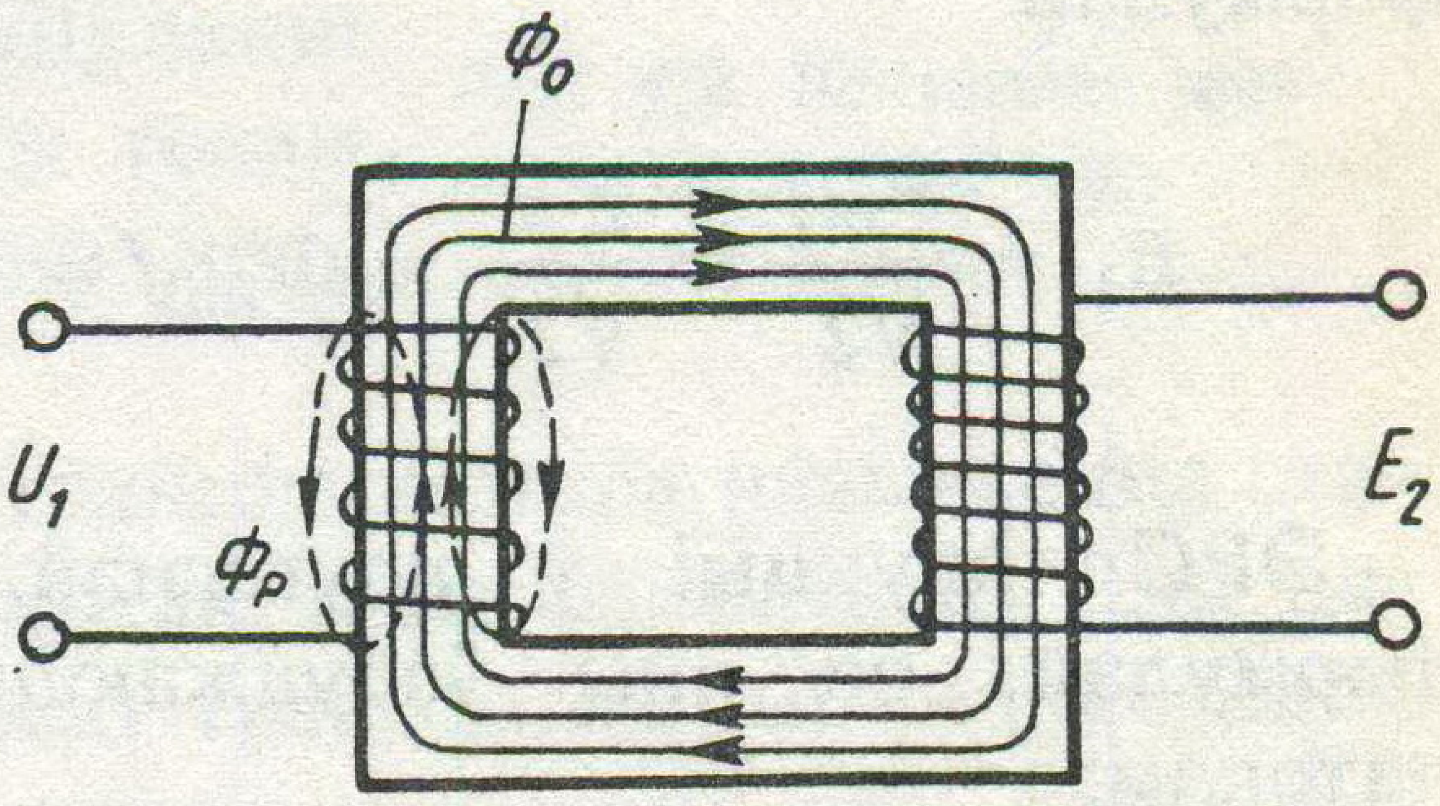
5. Чаму абмотка з меншым лікам віткоў размяшчаецца бліжэй да стрыжня, а зверху намотваецца з большым лікам віткоў?

6. Як падзяляюцца аднафазныя трансфарматары ў залежнасці ад формы стрыжня?

4.2. Рэжым халастога ходу трансфарматара

Халастым ходам трансфарматара называецца такі рэжым, пры якім другасная абмотка разамкнутая ($I_2 = 0$).

Работа трансфарматара заснавана на прынцыпе электрамагнітнага ўзаемадзеяння двух або некалькіх нерухомых электрычных контураў. На рыс. 4.1 схематычна паказана ўстройства аднафазнага трансфарматара. Пры падключэнні першаснай абмоткі трансфарматара да сінусоіднага напружання сеткі ў ёй з'явіцца пераменны ток $i = I_m \sin \omega t$, які стварае магнітны паток Ф першаснай абмоткі. Асноўная частка гэтага магнітнага патоку сканцэнтравана ў магнітаправодзе і называецца *рабочым патокам* Φ_0. З-за гістэрэзіса ў магнітаправодзе рабочы магнітны паток будзе адставаць па фазе ад намагнічвальнага току: $\Phi_0 = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha)$.



Рыс. 4.1. Схема простага аднафазнага трансфарматара

Невялікая частка магнітнага патоку замыкаецца каля віткоў, праходзіць у асноўным свой шлях па паветры і называецца *патокам рассеяння* Φ_p. Паток рассеяння супадае па фазе з токам:

$$\Phi_p = \Phi_{mp} \sin \omega t .$$

Магнітны паток рассеяння ўзбуджае ў першаснай абмотцы трансфарматара ЭРС рассеяння:

$$e_p = -w_1(d\Phi_p/dt) = -w_1\omega\Phi_{mp}\cos \omega t =$$

$$= w_1\omega\Phi_{mp}\sin(\omega t - 90°) , \qquad (4.1)$$

дзе w_1 — лік віткоў у абмотцы.

З раўнання (4.1) відавочна, што ЭРС самаіндукцыі адстае па фазе ад магнітнага патоку рассеяння на 90°. Рабочы магнітны паток адначасова пранізвае першасную і другасную абмоткі трансфарматара і ўзбуджае ў першаснай абмотцы ЭРС самаіндукцыі E_1, а ў другаснай — ЭРС індукцыі E_2.

Імгненнае значэнне ЭРС самаіндукцыі $e_1 = -w_1(d\Phi_0/dt) = -w_1\omega\Phi_{m0}\cos(\omega t - \alpha) = w_1\omega\Phi_{m0}\sin(\omega t - \alpha - 90°)$. Значыць, ЭРС самаіндукцыі адстае па фазе ад рабочага магнітнага патоку на 90°. Велічыня перад знакам сінуса вызначае амплітуду ЭРС:

$$E_m = w_1\omega\Phi_{m0} = w_1\Phi_{m0}2\pi f. \quad (4.2)$$

З раўнання (4.2) дзейнае значэнне ЭРС самаіндукцыі выразіцца формулай

$$E_1 = \frac{F_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}\, w_1\Phi_{m0}f = 4{,}44w_1\Phi_{m0}f.$$

ЭРС індукцыі ў другаснай абмотцы выразіцца аналагічнай формулай, бо яны ўзбуджаюцца адным і тым жа магнітным патокам:

$$E_2 = 4{,}44w_2\Phi_{m0}f.$$

Дзейнае значэнне ЭРС рассеяння: $E_p = 4{,}44w_1\Phi_{mp}f$.

E — комплексная ЭРС самаіндукцыі першаснай абмоткі, паводле закону Фарадэя, накіравана ў процілеглы бок падведзенаму да першаснай абмоткі напружанню $\dot{U}_1$. Значыць, падведзенае напружанне ўраўнаважвае ЭРС самаіндукцыі $\dot{E}_1$, ЭРС рассеяння $\dot{E}_p$ і стварае падзенне напружання на актыўным супраціўленні першаснай абмоткі $r\dot{I}_0$.

Частка падведзенага напружання, якая ўраўнаважвае ЭРС рассеяння, паказвае падзенне напружання на індуктыўным супраціўленні рассеяння $(x_1\dot{I}_0 = -\dot{E}_{1p})$.

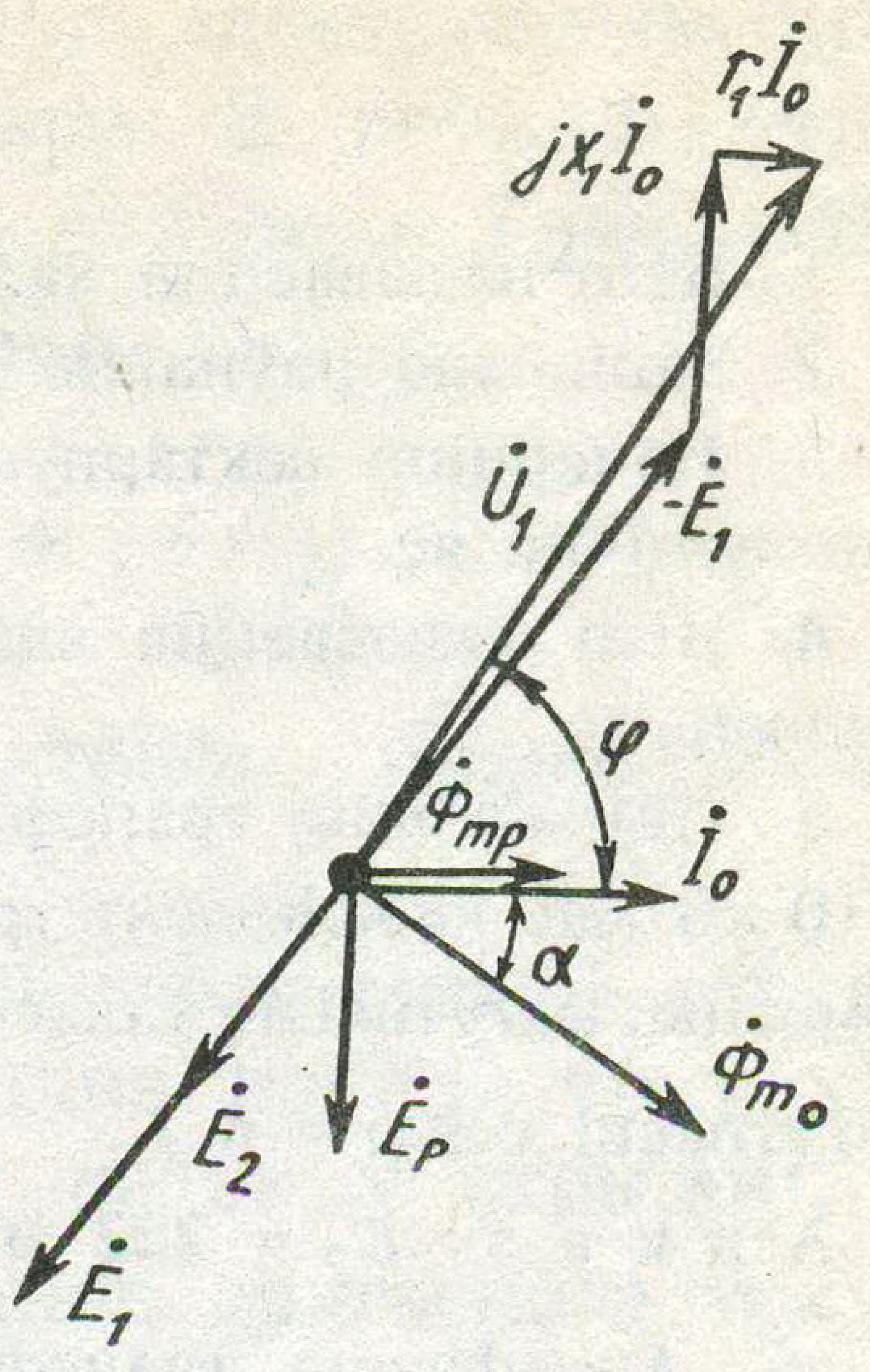
Электрычную раўнавагу трансфарматара ў рэжыме халастога ходу можна запісаць з дапамогай раўнання

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1\dot{I}_0 + r\dot{I}_0 \quad (4.3)$$

і паказаць вектарнай дыяграмай (рыс. 4.2).

Ток I_0 з'яўляецца токам халастога ходу трансфарматара і складае 3—10 % намінальнага току.

Чарціць дыяграму халастога ходу трансфарматара трэба пачынаць з вектара комплекснага току $\dot{I}_0$. З ім супадае па фазе вектар рассеяння магнітнага патоку $\dot{\Phi}_{mp}$, а вектар рабочага магнітнага патоку $\dot{\Phi}_{m0}$ з-за гістэрэзіса адстае на вугал α. Вектары ЭРС $\dot{E}_1$ і $\dot{E}_2$ адстаюць на 90° ад вектара $\dot{\Phi}_{m0}$. Вектар падведзенага напружання роўны суме $\dot{E}_1$ — вектара ЭРС самаіндукцыі з адваротным знакам, $jx_1\dot{I}_0$ — вектара падзення напружання на індуктыўным супраціўленні і $r_1\dot{I}_0$ — вектара падзення напружання на актыўным супраціўленні першаснай абмоткі. Зрух фаз паміж токам і напружаннем у рэжыме халастога ходу трансфарматара блізкі да 90°.



Рыс. 4.2. Вектарная дыяграма халастога ходу трансфарматара

Каэфіцыентам трансфармацыі трансфарматара называецца стасунак дзейных значэнняў ЭРС абмотак трансфарматара. Для аднафазнага трансфарматара каэфіцыент трансфармацыі вызначаецца формулай $k = E_1/E_2 = w_1/w_2$. E_2 можна вымераць пры непасрэдным падключэнні вальтметра да клем незамкнутай другаснай абмоткі. У гэтым выпадку $U_2 \approx E_2$.

У сілавых трансфарматарах падзенне напружання на актыўным і індуктыўным супраціўленні рассеяння першаснай абмоткі пры халастым ходзе трансфарматара складае 1—2 % падведзенага напружання. Таму гэтыя велічыні можна ігнараваць і раўнанне (4.3) атрымае выгляд $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ або $|U_1| = |E_1|$.

Такім чынам, каэфіцыент трансфармацыі з улікам зробленых дапушчэнняў можна вызначыць шляхам вымярэння напружання ў сетцы і ЭРС другаснай абмоткі трансфарматара:

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2 \approx U_1/U_2 .$$

Рэжым халастога ходу трансфарматара дае магчымасць практычна вызначыць каэфіцыент трансфармацыі. У пашпарце трансфарматара ўказваецца каэфіцыент трансфармацыі як адносіна вышэйшага напружання да ніжэйшага: напрыклад, 110/35; 10/0,4 (напружанні ўзяты ў кілавольтах).

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца халастым ходам трансфарматара?

2. Запішыце раўнанне электрычнай раўнавагі халастога ходу трансфарматара.

3. Начарціце вектарную дыяграму трансфарматара ў рэжыме халастога ходу і растлумачце яе.

4. Што называецца каэфіцыентам трансфармацыі трансфарматара і як яго вызначыць?

5. Паніжальны трансфарматар для падключэння ў сетку з напружаннем $U_1 = 10$ кВ мае каэфіцыент трансфармацыі $k = 45$. Вызначце напружанне на другаснай абмотцы, магутнасць халастога ходу трансфарматара, калі ток $I_0 = 5$ А, а каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi = 0{,}2$.

Адказ: $U_2 = 222$ В; $P = 10$ кВт.

6. Аднафазны трансфарматар мае $w_2 = 100$ віткоў у другаснай абмотцы і падключаны ў сетку напружаннем $U_1 = 220$ В. Чаму роўны лік віткоў у першаснай абмотцы трансфарматара і ЭРС у другаснай абмотцы, калі каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара $k = 10$?

Адказ: $w_1 = 1000$; $E_2 = 22$ В.

7. Пры халастым ходзе трансфарматара $U_1 = 110$ В, $U_2 = 220$ В, $f = 50$ Гц. Вызначце каэфіцыент трансфармацыі, лік віткоў у першаснай і другаснай абмотках, калі $\Phi_m = 5 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Адказ: $k = 2$; $w_1 = 1000$; $w_2 = 2000$.

4.3. Рабочы рэжым трансфарматара

Рабочым рэжымам трансфарматара называецца работа трансфарматара пры замкнутай другаснай абмотцы на нагрузку. Пры падключэнні нагрузкі да клем другаснай абмоткі з пераменнай ЭРС у ёй з'явіцца ток I_2, які стварае пераменны магнітны паток другаснай абмоткі Φ_2. Паводле закону Ленца магнітны паток Φ_2 мае напрамак, процілеглы магнітнаму патоку Φ_1 першаснай абмоткі.

Памяншэнне магнітнага патоку ў першаснай абмотцы вядзе да памяншэння E_1. Пры гэтым парушаецца раўнавага $\dot{U}_1 \approx \approx -\dot{E}_1$ і павялічваецца ток $\dot{I}_1$. Павелічэнне току $\dot{I}_1$ вядзе да павелічэння магнітнага патоку Φ_1 і ЭРС E_1 да аднаўлення гэтай раўнавагі. Для комплексных дзейных значэнняў магнітных патокаў можна запісаць

$$\dot{\Phi}_0 \approx \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 . \tag{4.4}$$

Значыць, рабочы магнітны паток застаецца аднолькавым пры халастым і рабочым рэжымах трансфарматара. З роўнаці (4.4) можна запісаць $\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1$ або $\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 - \dot{I}_2 w_2$. Падзяліў абедзве часткі роўнасці на w_1, атрымаем

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}\right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{1}{k}\dot{I}_2\right) = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2),$$

дзе I'_2 называецца прыведзеным другасным токам, прыведзеным да ліку віткоў першаснай абмоткі.

Такім чынам, ток першаснай абмоткі трансфарматара можна паказаць ў выглядзе дзвюх састаўляльных, адна роўная току халастога ходу $\dot{I}_0$ і стварае асноўны магнітны паток у стрыжні, а другая $(\dot{I}'_2)$ кампенсуе размагнічвальнае дзеянне другаснага току.

З павелічэннем нагрузкі трансфарматара павялічваюцца токі $\dot{I}_2$ і $\dot{I}_1$, а значыць расце і магутнасць, якая пастулае з сеткі. Пры змяншэнні нагрузкі змяншаецца другасны ток, значыць і першасны ток таксама павінен зменшыцца. У гэтым сутнасць агульнага прынцыпу самарэгулявання, які дзейнічае для ўсіх электрычных машын. Ток другаснай абмоткі $\dot{I}_2$ стварае таксама магнітны паток рассеяння Φ_{p2}, які ўзбуджае ЭРС самаіндукцыі ў другаснай абмотцы E_{p2}. Паколькі магнітны паток рассеяння замыкаецца ў асноўным праз паветра, то вектар магнітнага рассеяння супадае па фазе з вектарам току $\dot{I}_2$, а ЭРС другаснай абмоткі E_{p2} адстае па фазе ад магнітнага патоку Φ_{p2} на 90°. Такім чынам, ЭРС другаснай абмоткі E_2 стварае напружанне на клемах другаснай абмоткі U_2 і падзенне напружання на актыўным і рэактыўным супраціўленнях другаснай абмоткі ($r_2\dot{I}_2$ і $jx_2\dot{I}_2 = -\dot{E}_{p2}$) — на ўнутраным супраціўленні другаснай абмоткі, што можна запісаць у выглядзе сумы дзейных значэнняў комплексных велічынь:

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + r_2\dot{I}_2 + jx_2\dot{I}_2, \quad \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + Z_2\dot{I}_2$$

або

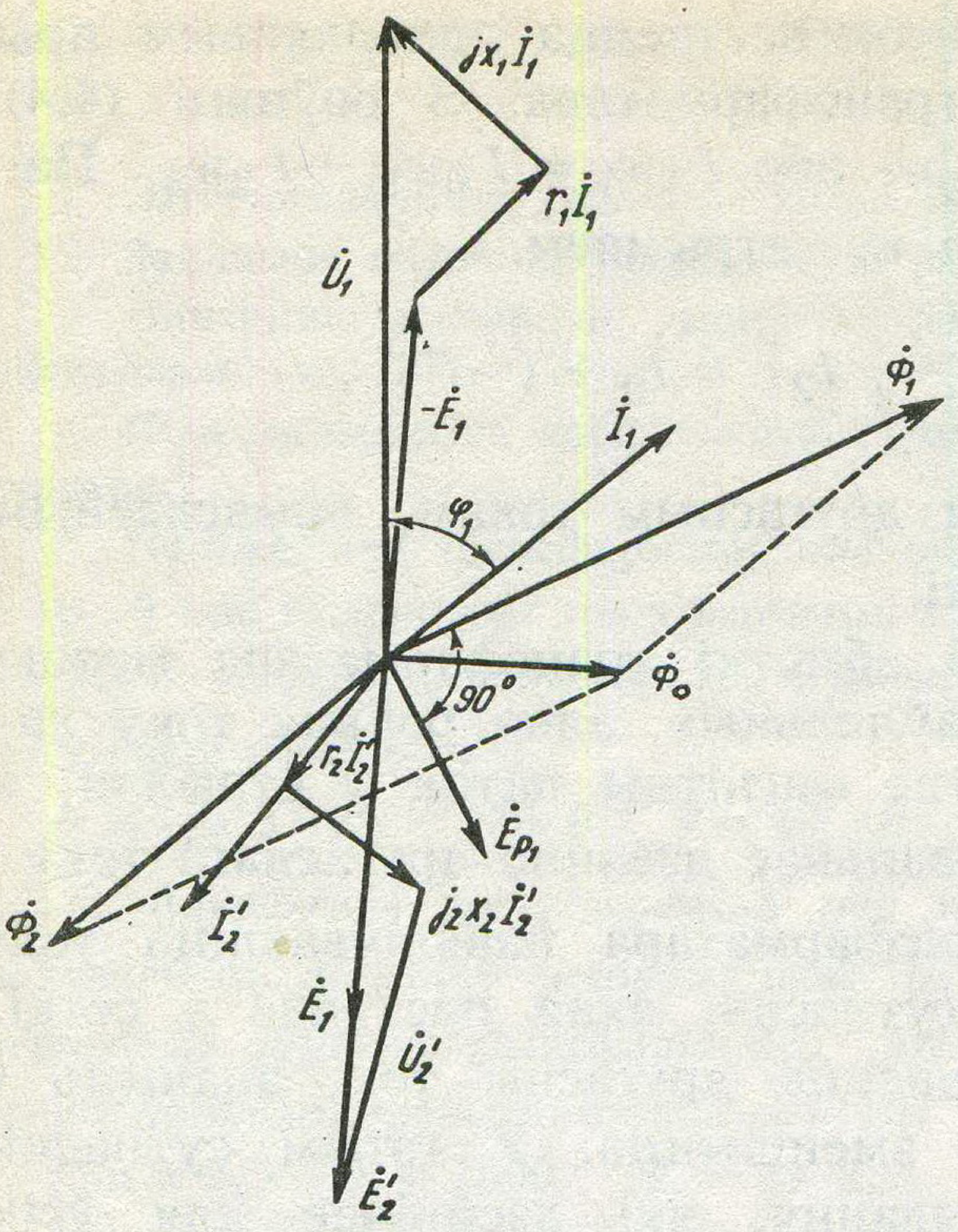
$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - Z_2\dot{I}_2,$$

дзе $Z_2 = r_2 + jx_2$,

Для першаснага ланцуга ў рэжыме нагрузкі трансфарматара вектарнае раўнанне будзе мець выгляд

$$\dot{U}_1 = -\dot{E} + r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1 \quad \text{або} \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1\dot{I}_1.$$

На рыс. 4.3 начэрчана вектарная дыяграма рабочага рэжыму трансфарматара. На гэтай дыяграме ўсе вектарныя велічыні токаў



Рыс. 4.3. Вектарная дыяграма рабочага рэжыму трансфарматара

і напружання другаснай абмоткі прыведзены да першаснага ланцуга, каб вектары пераменнага і другаснага ланцуга былі сувымерныя на вектарнай дыяграме.

Пры прывядзенні да першаснага ланцуга ў паніжальным трансфарматары другаснае напружанне памнажаецца на каэфіцыент трансфармацыі k $(U'_2 = kU_2)$, а другасны ток дзеліцца на $k = \left(I'_2 = \frac{1}{k} I_2\right)$.

У рабочым рэжыме трансфарматара ў другаснай абмотцы праходзіць ток $\dot I_2$, адпаведны на дыяграме ў прыведзеным выглядзе току $\dot I'_2$, а ў першаснай абмотцы ток $\dot I_1$. Гэтыя токі ствараюць магнітныя патокі $\dot \Phi_1$ і $\dot \Phi_2$, накіраваныя амаль процілегла адзін да аднаго. Геаметрычная сума вектараў $\dot \Phi_1$ і $\dot \Phi_2$ дае вектар рабочага магнітнага патоку $\dot \Phi_0$, які ўзбуджае ЭРС $\dot E_1$ і $\dot E_2$. Гэтыя ЭРС адстаюць ад яго па фазе на 90 °. Вектар $\dot E'_2$ з'яўляецца геаметрычнай сумай напружання на клемах другаснай абмоткі $\dot U'_2$ і падзення напружання на ўнутраным супраціўленні другаснай абмоткі ($r_2\dot I'_2$ і $jx\dot I'_2$). На дыяграме гэтыя велічыні паказаны вектарамі ў прыведзеным выглядзе, вектар $r_2\dot I'_2$ супадае з напрамкам вектара току $\dot I_2$, а вектар $jx_2\dot I'_2$ апярэджвае яго на 90°. Вугал φ_2 паказвае зрух фаз паміж токам $\dot I_2$ і напружаннем $\dot U_2$ у другаснай абмотцы трансфарматара пры нагрузцы.

Дыяграма токаў і напружанняў першаснай абмоткі аналагічная дыяграме гэтых велічыняў у рэжыме халастога ходу, дзе $I_1 > I_0$. На вектарнай дыяграме бачна, што ЭРС другаснага ланцуга $\dot E'_2$ роўная геаметрычнай суме наступных велічынь: $\dot E'_2 = \dot U'_2 + r_2\dot I'_2 jx_2\dot I'_2$.

Вектары $jx_1\dot I_1$, $jx_2\dot I'_2$, $r_1\dot I_1$, $r_2\dot I'_2$ на дыяграме павялічаны. У сапраўднасці ж яны складаюць 2—3 % намінальных значэнняў напружання.

Трансфарматары не з'яўляюцца крыніцамі энергіі, яны толькі пераўтвараюць пераменны ток аднаго напружання ў пераменны

ток другога напружання пры высокім ККД. Пры намінальнай нагрузцы ККД трансфарматара складае 90—99 %. Таму, калі не ўлічваць невялікую розніцу паміж $\cos\varphi_1$ і $\cos\varphi_2$, можна запісаць: $P_1 = P_2$ або

$$I_1U_1\cos\varphi_1 = U_2\cos\varphi_2,$$

дзе P_1 магутнасць, якая паступае з сеткі ў трансфарматар; P_2 — магутнасць, якая здымаецца з другаснай абмоткі трансфарматара.

Значыць, $I_1U_1 \approx I_2U_2$ або $I_1/I_2 = U_2/U_1$. Токі ў абмотках трансфарматара пры намінальнай нагрузцы адваротна прапарцыйныя напружанню на абмотках.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца рабочым рэжымам трансфарматара?

2. Чаму магнітныя патокі Φ_1 і Φ_2 зрушаны па фазе амаль на 180° ?

3. Чаму пры павелічэнні нагрузкі трансфарматара павялічваецца ток у першаснай абмотцы трансфарматара?

4. Напішыце раўнанне электрычнага становішча трансфарматара ў рабочым рэжыме і растлумачце фізічны працэс у гэтым рэжыме.

5. Начарціце вектарную дыяграму токаў і напружанняў трансфарматара ў рабочым рэжыме і растлумачце яе.

6. Аднафазны трансфарматар магутнасцю $S = 1{,}1$, кВ·А мае ў першаснай абмотцы $w_1 = 900$ віткоў, а ў другаснай $w_2 = 150$ віткоў. Вызначце каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара, ток у першаснай і другаснай абмотках, а таксама напружанне на клемах другаснай абмоткі пры падключэнні трансфарматара ў сетку з напружаннем $U_1 = 220$ В. Страты ў трансфарматары не ўлічвайце.

Адказ: $k = 6$; $I_1 = 5$ А; $I_2 = 30$ А; $U_2 = 36{,}7$ В.

7. На клемах абмотак у рэжыме халастога ходу трансфарматара напружанні: $U_1 = 248$ В, $U_2 = 6{,}2$ В. Вызначце каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара, лік віткоў у першаснай абмотцы, ток у першаснай абмотцы пры супраціўленні нагрузкі $z_2 = 3$ Ом, калі $w_2 = 60$ віткоў, а напружанне пры нагрузцы $U_2 = 0{,}98U_{20}$. Ток халастога ходу I_0 не ўлічваць.

Адказ: $k = 40$; $w_1 = 2400$ віткоў; $I_1 = 50$ мА.

4.4. ККД трансфарматара

ККД трансфарматара, як і ўсякай іншай машыны, вызначаецца стасункам карыснай магутнасці да ўсёй падведзенай. Карыснай магутнасцю для трансфарматара з'яўляецца магутнасць, якая

здымаецца з другаснай абмоткі, $P_2 = I_2U_2\cos\varphi_2$, а падведзенай — магутнасць P_1, якая падаецца з сеткі ў першасную абмотку. Паколькі ў трансфарматары ККД роўны 0,96—0,99, то непасрэднае вызначэнне яго па формуле $\eta = P_2/P_1$ не дае станоўчых вынікаў таму, што памылка ў вымярэнні сувымерная з хібнасцю прыбораў.

Магутнасць, што паступае з сеткі, можа быць выражана праз карысную магутнасць і страты магутнасці ў трансфарматары. Электрычныя страты ў трансфарматары складаюцца са страт у медзі $P_м$, якія абумоўліваюцца награваннем праваднікоў абмотак трансфарматара, і страт у сталі $P_{ст}$, выкліканых гістэрэзісам і віхравымі токамі ў стрыжні. У такім выпадку ККД трансфарматара можна выразіць формулай

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_м + P_{ст.}} = \frac{I_2U_2\cos\varphi_2}{I_2U_2\cos\varphi_2 + P_м + P_{ст}}.$$

Страта магутнасці ў медзі вызначаецца як сума страт у першаснай і другаснай абмотках: $P_м = r_1I_1^2 + r_2I_2^2$. Страта магутнасці ў медзі залежыць ад нагрузкі трансфарматара і з'яўляецца пераменнай стратай. Страта магутнасці ў сталі вызначаецца значэннем і частатой змянення магнітнага патоку і ад нагрузкі трансфарматара не залежыць. Страта магутнасці ў сталі (стрыжні) з'яўляецца пастаяннай для трансфарматара.

У рабочым рэжыме трансфарматара напружанне на другаснай абмотцы лічаць роўным намінальнаму напружанню $U_2 \approx U_{н2}$, страту магутнасці ў стрыжні — пастаяннай $P_{ст} = \text{const}$. На практыцы пры рабоце трансфарматара ток у другаснай абмотцы I_2 не заўсёды роўны намінальнаму току. Таму ўводзіцца каэфіцыент нагрузкі $\beta = I_2/I_{н2}$ і ККД трансфарматара вызначаецца па наступнай формуле:

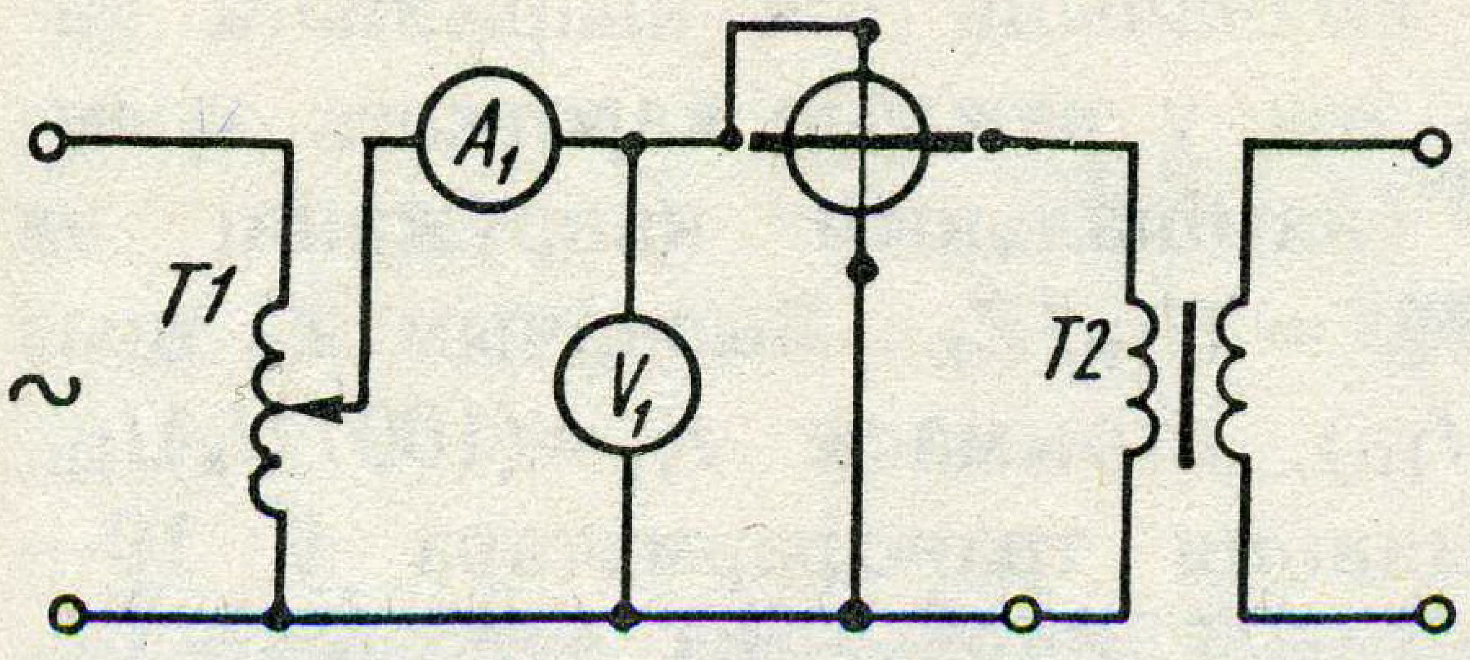
$$\eta = \frac{\beta I_{2н}U_{2н}\cos\varphi_2}{\beta I_{2н}U_{2н}\cos\varphi_2 + \beta^2 rI_н^2 + P_{ст}} = \frac{\beta S_н\cos\varphi_2}{\beta S_н\cos\varphi_2 + \beta^2 P_м + P_{ст}}.$$

Даследаванне функцыі $\eta = f(\beta)$ на максімум паказвае, што максімальны ККД трансфарматара атрымліваецца пры роўнасці страт ў медзі і ў сталі пры $\beta^2 P_м = P_{ст}$, гэта значыць пры $\beta = \sqrt{P_c/P_м}$.

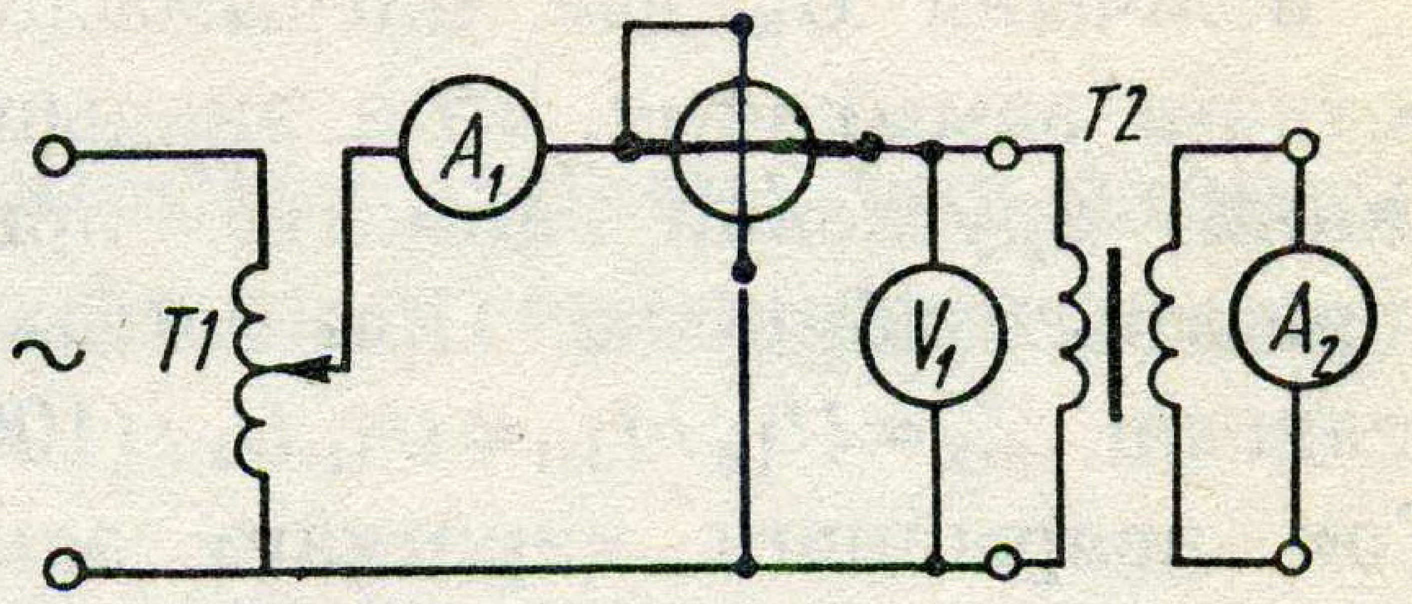
Паколькі звычайна $P_{ст} : P_м = 0{,}35-0{,}5$, то максімальны ККД трансфарматара атрымліваецца пры каэфіцыенце нагрузкі 0,6—0,7, значыць

$$S = (0{,}6-0{,}7)\, S_н.$$

Карысная магутнасць пры актыўнай нагрузцы вымяраецца з дапамогай амперметра і вальтметра, а пры змешанай (актыўнай і рэактыўнай) — аднафазнага ватметра. Страту магутнасці ў сталі можна вымяраць у рэжыме халастога ходу трансфарматара пры ўмовах, калі $U_{10} = U_{1н}$, з дапамогай аднафазнага ватметра, уключанага ў ланцуг першаснай абмоткі трансфарматара (рыс. 4.4).



Рыс. 4.4. Схема ланцуга для вымярэння страты ў сталі трансфарматара



Рыс. 4.5. Схема ланцуга для вымярэння страты ў медзі трансфарматара

Пры такім доследзе страту магутнасці ў медзі можна ігнараваць, бо ў другаснай абмотцы ток роўны нулю, а ў першаснай ток халастога ходу нязначны, і страта $P_м = r_1 I_0^2$ у першаснай абмотцы таксама нязначная. Страта магутнасці ў медзі вымяраецца ў рэжыме кароткага замыкання трансфарматара з дапамогай аднафазнага ватметра, уключанага ў ланцуг першаснай абмоткі трансфарматара (рыс. 4.5). У лабараторнай практыцы кароткае замыканне другаснай абмоткі трансфарматара можна выканаць шляхам падключэння да яе амперметра. Напружанне U_1 устанаўліваецца такім, каб ток I_2 быў намінальным, пры гэтым і ток I_1 будзе намінальным. Страту магутнасці ў сталі можна ігнараваць, бо яна абумоўлена магнітным патокам, які ў рэжыме кароткага замыкання трансфарматара зусім малы. Сапраўды, страта магутнасці ў медзі вызначаецца пры намінальных токах у абмотках трансфарматара. Пры кароткім замыканні другаснай абмоткі намінальны ток у ёй будзе створаны пры напружанні $U_{2к}$, значна меншым намінальнага напружання $U_{2н}$ ($U_{2к} << U_{2н}$), а значыць і магнітны паток у стрыжні будзе значна меншы намінальнага магнітнага патоку і яго можна ігнараваць. Змяненне намінальнага патоку ў стрыжні ўзбуджае $E_2(U_2)$ у другаснай абмотцы. З формулы (4.4), калі не ўлічваць магнітны паток Φ_0, можна запісаць роўнасць модуляў намагнічвальных сіл:

$$I_2 w_2 = I_1 w_1 \quad \text{або} \quad I_2/I_1 = w_1/w_2 = k,$$

дзе k — каэфіцыент трансфармацыі.

Такім чынам, ток у другаснай абмотцы пры кароткім замыканні трансфарматара можна вызначыць па току ў першаснай абмотцы: $I_2 = kI_1$, што і выконваецца на практыцы пры кароткім замыканні трансфарматараў вялікіх магутнасцей.

У пашпарце трансфарматара напружанне кароткага замыкання звычайна паказваецца ў працэнтах ад намінальнага напружання $U_к = (U_{1к}/U_{1н})100$ і складае ў сілавых трансфарматарах 4—10 %.

Велічыня $U_к$ дае магчымасць вызначыць ток аварыйнага кароткага замыкання, гэта значыць ток у рэжыме кароткага замыкання другаснай абмоткі пры намінальным напружанні на першаснай абмотцы. Пры гэтым $I_{1к} = U_{1н}/Z_к$. Вызначым $Z_к$ праз велічыні $Z_к=U_{1к}/I_{1н}=U_{1н}U_к/(100I_{1н})$, атрымаем $I_{1к}=(100/U_к)I_{1н}$. Ток аварыйнага кароткага замыкання трансфарматара ў 10—25 разоў перавышае намінальны ток і з'яўляецца сур'ёзнай небяспекай для трансфарматара.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца ККД трансфарматара?
2. Як эксперыментальна вызначыць ККД трансфарматара?
3. Чым абумоўлена страта магутнасці ў сталі і як яе вызначыць?
4. Чаму ігнаруюць страты магутнасці ў медзі пры халастым ходзе трансфарматара?
5. Чым абумоўлена страта магутнасці ў медзі і як яе вызначыць?
6. Чаму ігнаруюць страты магутнасці ў сталі пры кароткім замыканні трансфарматара?
7. Што такое каэфіцыент нагрузкі трансфарматара?
8. Пры якой нагрузцы трансфарматар мае максімальны ККД?
9. Як эксперыментальна вызначыць ток аварыйнага кароткага замыкання?
10. Аднафазны трансфарматар спажывае з сеткі магутнасць $P = 8{,}4$ кВт. Вызначце ток нагрузкі трансфарматара, калі напружанне на другаснай абмотцы трансфарматара $U_2 = 220$ В. Каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi = 0{,}85$, а ККД роўны 0,9.

Адказ: $I_2 = 40$ А.

11. Магутнасць у першасным ланцугу трансфарматара $P = 105$ Вт. Ад яго другаснай абмоткі сілкуецца награвальны прыбор пры $U_2 = 6$ В і току $I_2 = 14$ А. Вызначце каэфіцыент карыснага дзеяння і страту магутнасці ў медзі, калі страта пры халастым ходзе $P_{ст} = 5$ Вт.

Адказ: $\eta = 0{,}8$; $P_м = 16$ Вт.

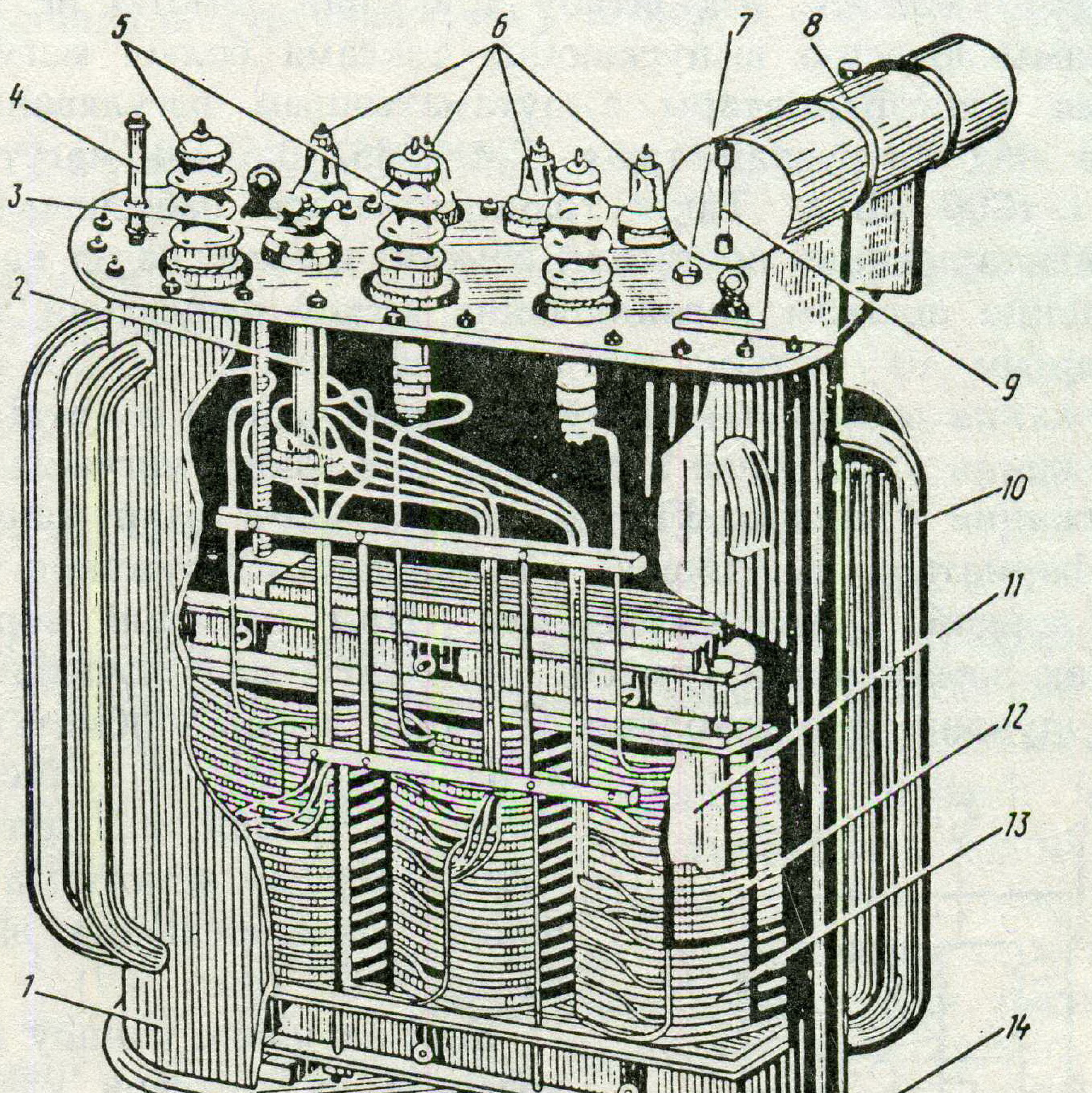
12. Пры даследаванні аднафазнага трансфарматара ў рэжыме халастога ходу $U_{10} = 330$ В, $U_{20} = 220$ В, $I_{10} = 0{,}182$ А, $P_{10} = 70$ Вт, а пры кароткім замыканні ва ўмовах намінальных токаў $U_{1к} = 188$ В, $I_{1к} = 3{,}04$ А, $I_{2к} = 45{,}5$ А і $P_{1к} = 250$ Вт. Вызначце намінальную магутнасць трансфарматара, каэфіцыент трансфармацыі, напружанне кароткага замыкання, актыўнае і поўнае супраціўленне абмотак (пры ўмове, што страты ў медзі і адноснае падзенне напружання размяркоўваюцца паміж

абмоткамі пароўну: $P_к/2$, $U_к/2$); ККД трансфарматара пры $\cos\varphi = 0{,}8$, намінальнай нагрузцы і пры каэфіцыенце нагрузкі $\beta = 0{,}8$.

Адказ: $S_н = 10$ кВ·А; $k = 15$; $U_{1к} = 5{,}7$ %; $r_1 = 13{,}5$ Ом; $r_2 = 0{,}06$ Ом; $z_1 = 31$ Ом; $z_2 = 2{,}1$ Ом; $\eta_1 = 96{,}2$ %; $\eta_2 = 96{,}8$ %.

4.5. Устройства і прынцып работы трохфазных трансфарматараў

Трохфазны трансфарматар (рыс. 4.6) складаецца з магнітаправода *11*, абмоткі ніжэйшага напружання *12*, абмоткі вышэйшага напружання *13* і бака *1*, запоўненага трансфарматарным маслам.



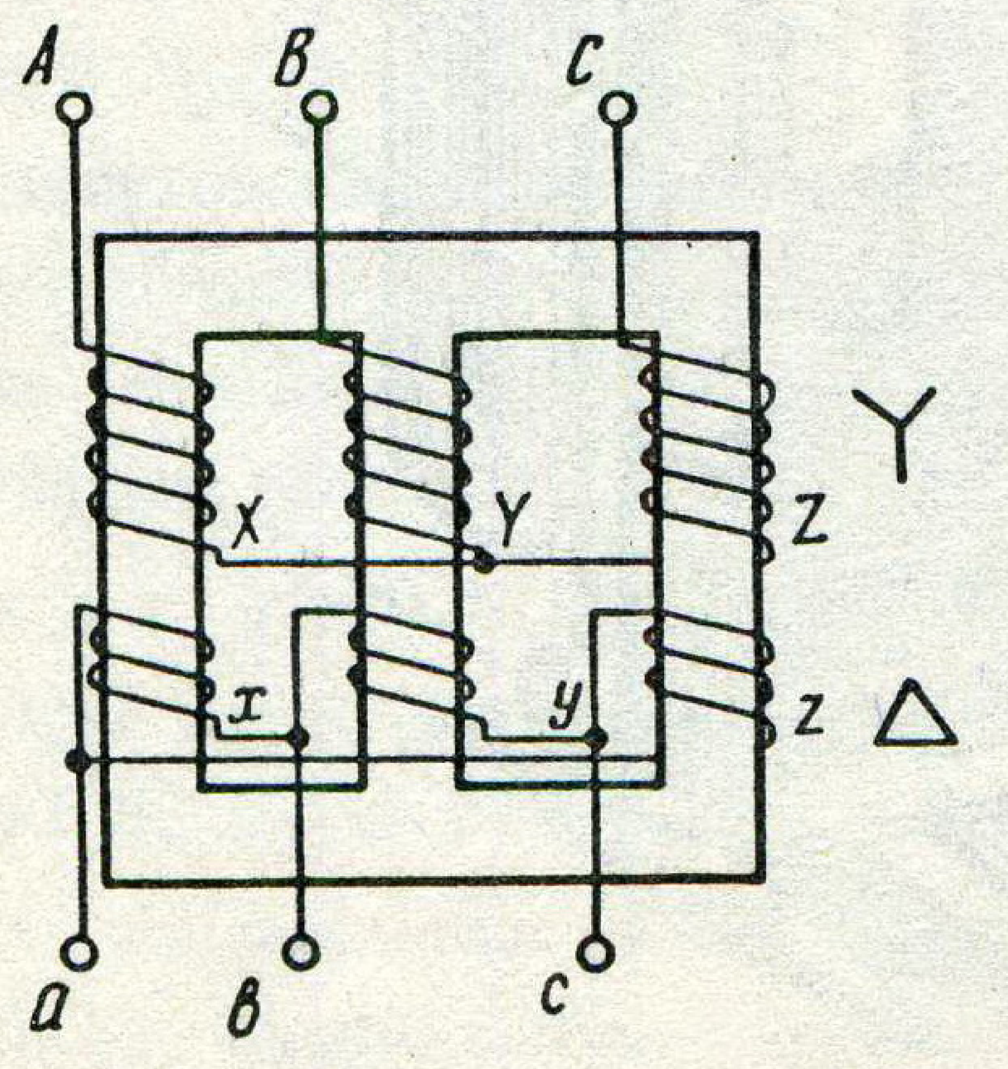
Рыс. 4.6. Трохфазны трансфарматар

Масла ў бак заліваецца праз адтуліну ў накрыўцы *7*, а зліваецца праз адтуліну *14*. Вывад абмотак ВН праз накрыўку бака ажыццяўляецца з дапамогай прахадных ізалятараў *5*, а абмотак НН — з дапамогай прахадных ізалятараў *6*. Для лепшай цеплааддачы паверхня бака робіцца з цыркуляцыйнымі трубамі *10*. Пры нагрузцы трансфарматара масла награваецца і пашыраецца. Для збірання лішку масла ўстанаўліваецца пашыральнік *8* з масламернай шкляной трубкай *9*. Для наглядання за тэмпературай масла на накрыўцы бака ўстанаўліваецца тэрмометр *4*, акрамя гэтага, пераключальнік ліку віткоў абмотак ВН *2* і прывод *3* да пераключальніка.

Трансфарматары на 10 кВ робяцца з трубчатымі сценкамі і пашыральнікам.

Прамысловасцю выпускаюцца трохфазныя трансфарматары з рэгуляваннем напружання пад нагрузкай. Для рэгулявання напружання абмотка вышэйшага напружання мае тры адгаліненні (+5 %; 0; −5 %). Лік віткоў другаснай абмоткі не змяняецца.

Прамысловасцю выпускаюцца таксама больш магутныя трохфазныя трансфарматары з аўтаматычным рэгуляваннем напружання пад нагрузкай тыпу ТМН 35/10,5 кВ магутнасцю 560, 1000 і 1800 кВ·А. Такія трансфарматары забяспечваюць пастаянства напружання другаснай абмоткі незалежна ад нагрузкі. Гэта дасягаецца шляхам пераключэння віткоў першаснай абмоткі пры нязменным ліку віткоў другаснай абмоткі. Віткі для рэгулявання напружання размяшчаюцца ў сярэдняй частцы абмоткі вышэйшага напружання ў выглядзе 8 секцый, якія даюць магчымасць змяняць напружанне ў межах ±10 % намінальнага напружання. Абмоткі трансфарматара вышэйшага і ніжэйшага напружання можна злучаць зоркай і трохвугольнікам. Пры злучэнні зоркай канцы абмотак замыкаюцца сумесна, а пачаткі падключаюцца да сеткі. Пры злучэнні трохвугольнікам канец першай абмоткі злучаецца з пачаткам другой, канец другой з пачаткам трэцяй, канец трэцяй з пачаткам першай абмоткі, а вузлы злучэнняў падключаюцца да сеткі або да нагрузкі (рыс. 4.7).



Рыс. 4.7. Схема злучэння абмотак трохфазнага трансфарматара

Калі злучэнне канцоў абмотак выводзіцца да нулявой клемы на накрыўцы трансфарматарнага бака, то пішацца значок з нулём (Y_0).

У залежнасці ад спосабу злучэння абмотак, размяшчэння фаз і вывадаў фазных абмотак трохфазныя трансфарматары падзяляюцца на 12 груп.

Кожная група злучэння трансфарматараў адрозніваецца ад суседняй зрухам фаз лінейных напружанняў на 30°.

У практыцы знайшлі выкарыстанне наступныя спосабы злучэння абмотак трохфазных трансфарматараў: Y/Y_0 або Y/Y; Y/Δ; Δ/Δ. Па ДАСТу прынятыя да эксплуатацыі толькі тры групы злучэння: $Y/Y-12$; $Y/\Delta-11$ і $Y_0/\Delta-11$. У групе злучэння $Y/Y-12$ вугал паміж вектарамі лінейных напружанняў першаснай і другаснай абмотак роўны 0° або 360° (30° x12 = = 360°), што адпавядае 12-й групе злучэння. У групе злучэння $Y/\Delta-11$ вугал зруху фаз паміж лінейнымі напружаннямі першаснай і другаснай абмотак роўны 330° (30° x11 = 330°), што адпавядае 11-й групе злучэння.

Каэфіцыент трансфармацыі трохфазных трансфарматараў вызначаецца стасункам лінейных напружанняў абмотак вышэйшага і ніжэйшага напружання і залежыць не толькі ад ліку віткоў у абмотках ВН і НН, але і ад спосабу іх злучэння. Для паніжальных трансфарматараў пры злучэнні Y/Y і Δ/Δ каэфіцыент трансфармацыі вызначаецца стасункам ліку віткоў у абмотках трансфарматара:

$$k = U_1/U_2 = \sqrt{3}\,U_{\text{ф}1}/(\sqrt{3}\,U_{\text{ф}2}) = w_1/w_2\,.$$

Пры злучэнні Y/Δ і Δ/Y каэфіцыент трансфармацыі выразіцца наступнымі формуламі:

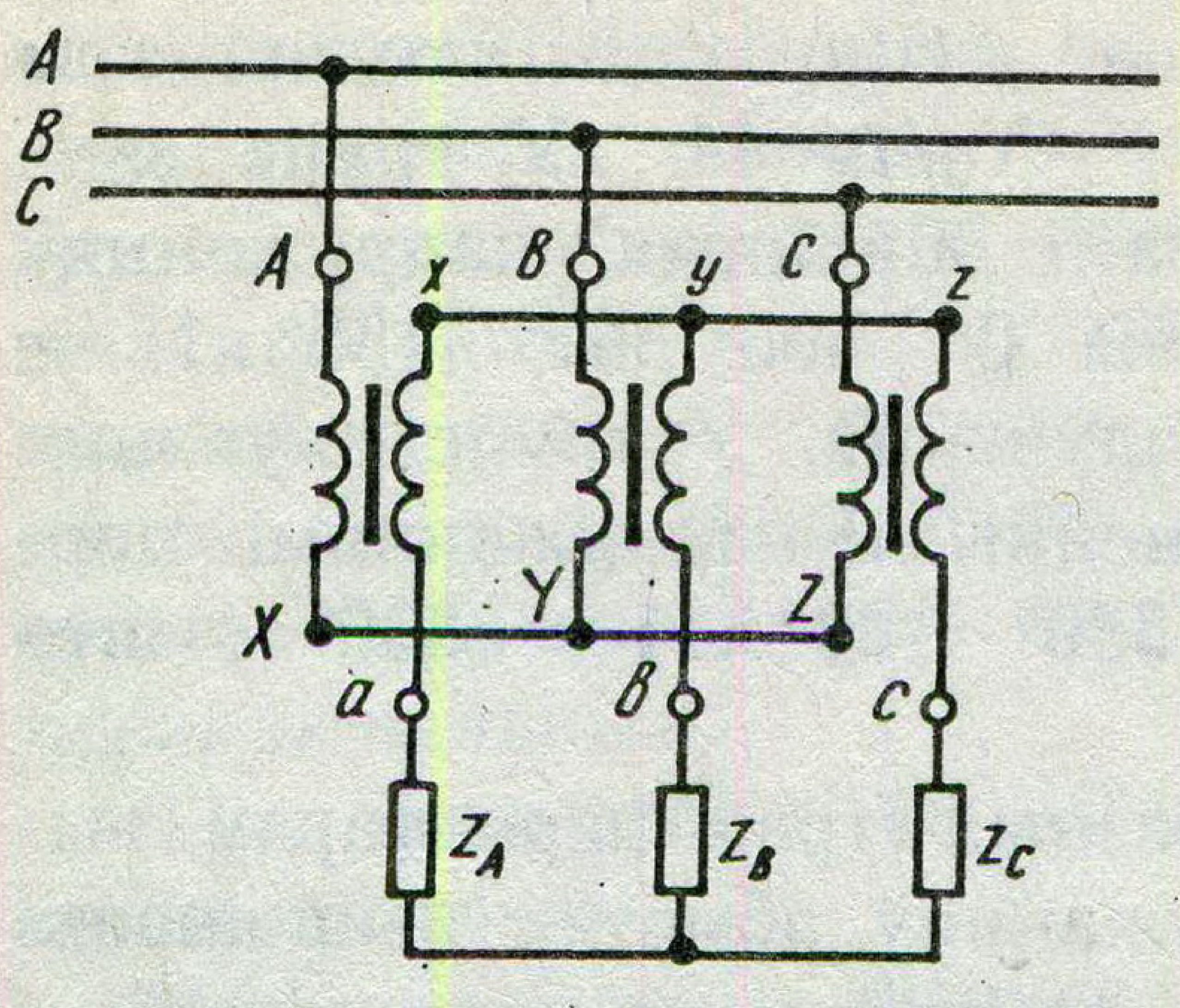
$$k = U_1/U_2 = \sqrt{3}\,U_{\text{ф}1}/U_{\text{ф}2} = \sqrt{3}\,w_1/w_2\,;$$

$$k = U_1/U_2 = U_{\text{ф}1}/(\sqrt{3}\,U_{\text{ф}2}) = w_1/(\sqrt{3}w_2)\,.$$

Для павышальных трансфарматараў каэфіцыент трансфармацыі запісваецца аналагічнымі формуламі. Сілавыя трансфарматары ў залежнасці ад канструкцыі і прызначэння бываюць розных тыпаў. Тып трансфарматара абазначаецца літарамі і лічбамі. Першая літара абазначае: А — аднафазны, Т — трохфазны; другая літара або другая і трэцяя — спосаб ахалоджвання (М — натуральнае маслянае; Ц — цыркуляцыя масла прымусовая, з дапамогай масляных насосаў; ДЦ — прымусовая цыркуляцыя масла праз ахаладжальнікі, якія абдзімаюцца паветрам; С — сухі, з паветраным ахалоджваннем). Далей літары абазначаюць: А — алюмініевыя абмоткі; Н — з рэгулятарам напружання пад нагрузкай; АН — са стабілізацыйным прыстасаваннем для рэгулявання напружання пад нагрузкай.

Лічба ў лічніку абазначае поўную магутнасць трансфарматара ў кілавольт-амперах, а ў назоўніку — вышэйшае напружанне ў

кілавольтах. Напрыклад, ТМН-630/10 — трохфазны трансфарматар з натуральным масляным ахаладжваннем, з рэгулятарам напружання пад нагрузкай, магутнасцю 630 кВ·А, вышэйшым напружаннем 10 кВ.



Рыс. 4.8. Падключэнне трох аднафазных трансфарматараў у трохфазны ланцуг па схеме Y/Y

На кожным трансфарматары маецца шчыток, на якім указаны тып трансфарматара, лінейныя токі пры намінальнай магутнасці, частата, лік фаз, схема і група злучэння абмотак.

Пераўтварэнне напружання трохфазнага ланцуга можна ажыццявіць з дапамогай трох аднафазных трансфарматараў. Першасныя і другасныя абмоткі трансфарматараў злучаюцца зоркай або трохвугольнікам і падключаюцца першасныя ў сетку, а другасныя на нагрузку (рыс. 4.8). Тры аднафазныя трансфарматары больш па габарыту і масе, чым адзін трохфазны на такую ж магутнасць. Аднак для трансфармавання трохфазнага току вялікай магутнасці прымяняецца група з трох аднафазных трансфарматараў. Аднафазныя трансфарматары лягчэй транспартаваць і ў рэзерве трэба мець адзін аднафазны, а не трохфазны трансфарматар.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зроблены трохфазны трансфарматар?
2. Якія групы злучэння прынятыя ДАСТам да эксплуатацыі?
3. Як вызначаецца каэфіцыент трансфармацыі трохфазнага трансфарматара і чаму ён роўны для групы злучэння $Y/\Delta-11$?
4. Якія абмоткі трансфарматара павінны быць першаснымі, а якія другаснымі і як іх злучыць, каб на другаснай абмотцы трансфарматара атрымаць найбольшае напружанне?
5. Як трэба змяніць лік віткоў у першаснай абмотцы рэгулюемага трансфарматара, каб павысіць напружанне на другаснай абмотцы?
6. Пры халастым ходзе трохфазнага трансфарматара $P_0 =$ 500 Вт, а пры намінальнай нагрузцы $P_1 =$ 57 кВт, $U_{2л} = 205$ В, $I_{2л} =$ 150 А. Вызначыць ККД трансфарматара, страту магутнасці ў медзі і агульную суму страт, калі нагрузка раўнамерная і $\cos\varphi_2 = 1$.

А д к а з: $\eta = 0{,}98$; $P_м = 708$ Вт; $P = 1208$ Вт.

7. Трохфазны трансфарматар магутнасцю $S_н =$ 120 кВ·А мае намінальныя напружанні $U_{1н} =$ 10 кВ і $U_{2н} =$ 0,4 кВ, страту халастога ходу $P_0 =$ 0,65 кВт, а

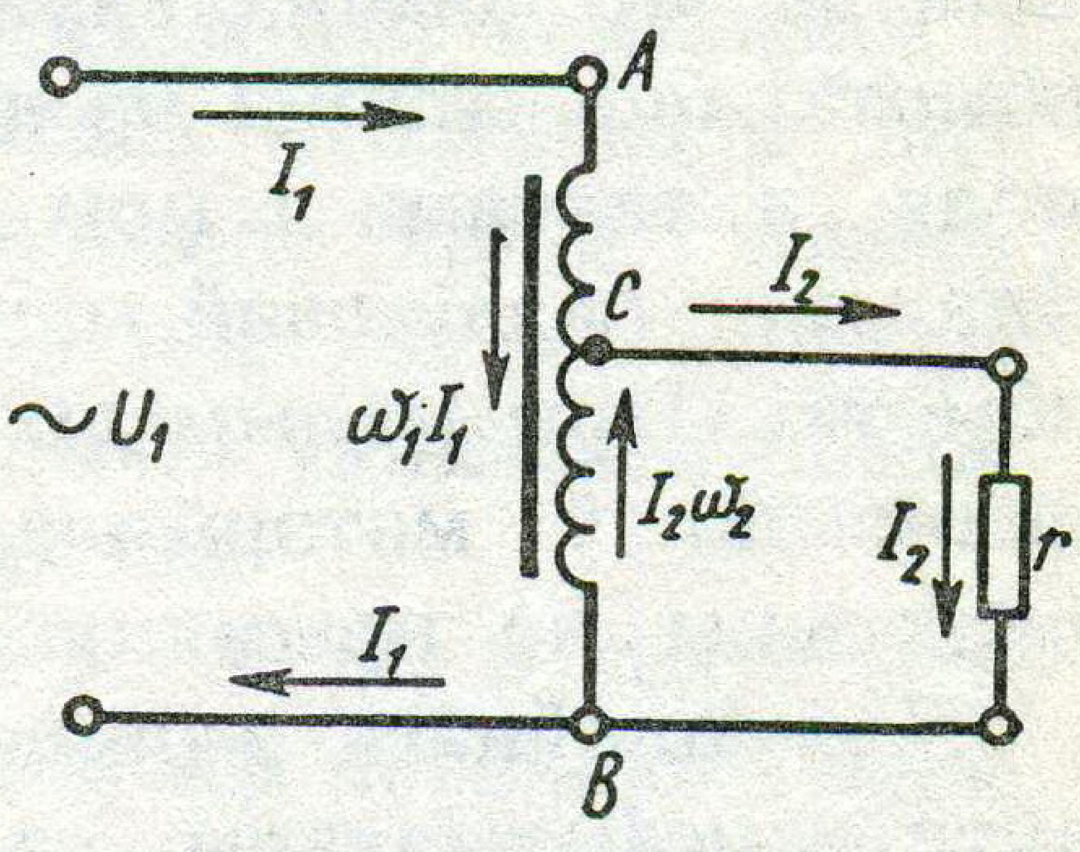
кароткага замыкання $P_к = 2,5$ кВт. Вызначце намінальныя токі першаснай і другаснай абмотак, ККД трансфарматара пры каэфіцыенце нагрузкі $\beta = 0,7$ і $\cos\varphi = 0,8$.

Адказ: $I_{1н} = 6,9$ А; $I_{2н} = 168,8$ А; $\eta = 0,97$.

4.6. Аўтатрансфарматары. Рэгулятар напружання школьны (РНШ)

Аўтатрансфарматары бываюць аднафазныя і трохфазныя. Аднафазны аўтатрансфарматар (рыс. 4.9) уяўляе сабой аднафазны трансфарматар з лікам віткоў другаснай абмоткі w_2, якая з'яўляецца часткаю першаснай абмоткі ($w_2 < w_1$). Абмотка трансфарматара размяшчаецца на замкнутым стрыжні з электратэхнічнай сталі.

Прынцып дзеяння аўтатрансфарматара заключаецца ў наступным: пры падключэнні абмоткі ў сетку пераменнага току напружаннем U_1 у ёй ствараецца пераменнае магнітнае поле, якое ўзбуджае ва ўсёй абмотцы ЭРС E_1, а ў частцы абмоткі з лікам віткоў w_2— ЭРС E_2. Значэнне E_2 залежыць ад ліку віткоў: $E_2 = Ew_2$, дзе E — ЭРС індукцыі ў адным вітку. ЭРС E_1 і E_2 па закону электрамагнітнай індукцыі маюць знакі, процілеглыя напружанню U_1, а значыць і ток I_2, створаны E_2, будзе мець напрамак, процілеглы напрамку току I_1. Такім чынам, у частцы абмоткі BC (w_2) будзе праходзіць ток $I_2 - I_1$, а ў другой частцы AC ($w_1 - w_2$) — ток I_1. Гэта прыводзіць да памяншэння цеплавых страт у абмотках аўтатрансфарматара ў параўнанні з двухабмоткавым і дае павелічэнне яго ККД. Віткі часткі абмоткі (w_2) можна зрабіць з проваду меншага сячэння, што таксама дае эканомію медзі і іншых матэрыялаў, памяншае габарыты аўтатрансфарматара.



Рыс. 4.9. Схема аднафазнага аўтатрансфарматара

Вызначым разліковую магутнасць аўтатрансфарматара, якая абумоўліваецца яго габарытамі і аб'ёмам медзі. Электрычная магутнасць часткі AC першаснай абмоткі роўная электрычнай магутнасці, якая здымаецца з другаснай абмоткі, — з часткі

BC. Сапраўды, для часткі віткоў AC разліковая электрычная магутнасць

$$S_{AC} = (E_1 - E_2)I_1 = E_1 I_1 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right),$$

а для часткі віткоў BC маем

$$S_{BC} = E_2(I_2 - I_1) = \frac{w_2}{w_1}E_1 \left(\frac{w_1}{w_2} I_1 - I_1\right) = E_1 I_1 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right).$$

Значыць, $S_{AC} = S_{BC}$. Для намінальных значэнняў току і напружання разліковая магутнасць трансфарматара запішацца ў такім выглядзе:

$$S = I_н U_н \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right) = S_н \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right).$$

Такім чынам, разліковая магутнасць аўтатрансфарматара меншая за яго намінальную магутнасць, бо магутнасць з першаснай абмоткі перадаецца на другасную не толькі з дапамогай магнітнага поля, а таксама і пры непасрэднай электрычнай сувязі абмотак. Значэнне разліковай магутнасці залежыць ад ліку віткоў другаснай абмоткі. Пры малым ліку віткоў w_2 аўтатрансфарматар дае малую эканомію ў матэрыялах у параўнанні з двухабмоткавым і ў практыцы не прымяняецца.

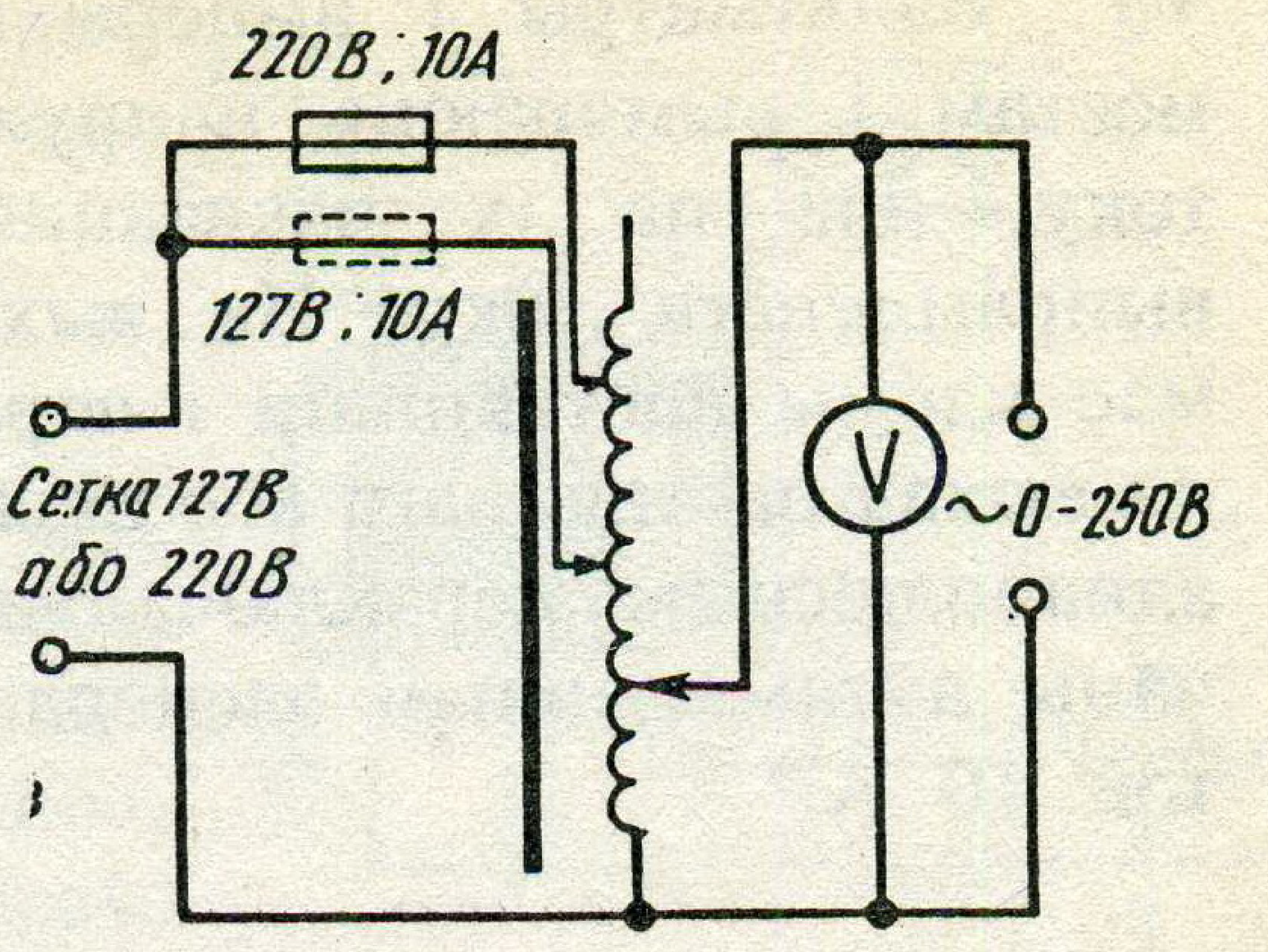
Для плаўнага змянення здымаемага напружання прымяняюць аўтатрансфарматары са слізготным кантактам (кантакт C на рыс. 4.9). Падобныя аўтатрансфарматары шырока прымяняюцца ў лабараторнай практыцы і называюцца *лабараторнымі аўтатрансфарматарамі* (ЛАТр).

Трохфазныя аўтатрансфарматары робяцца аналагічна трохфазным трансфарматарам, дзе тры другасныя абмоткі з'яўляюцца часткай віткоў першасных абмотак.

Аўтатрансфарматары выгадна прымяняць пры каэфіцыенце трансфармацыі, блізкім да адзінкі. Сілавыя аўтатрансфарматары выкарыстоўваюцца для рэгулявання напружання ў ланцугу пуску рухавікоў пераменнага току, у лабараторнай практыцы. Асноўнымі недахопамі аўтатрансфарматараў з'яўляюцца: нізкі каэфіцыент трансфармацыі; электрычная сувязь першаснай і другаснай абмотак, што пазбаўляе магчымасці прымяняць яго ў сетках высокага напружання, бо паяўляецца небяспека для абслуговага персаналу.

Рэгулятар напружання школьны (РНШ) — гэта аўтатрансфарматар са слізготным

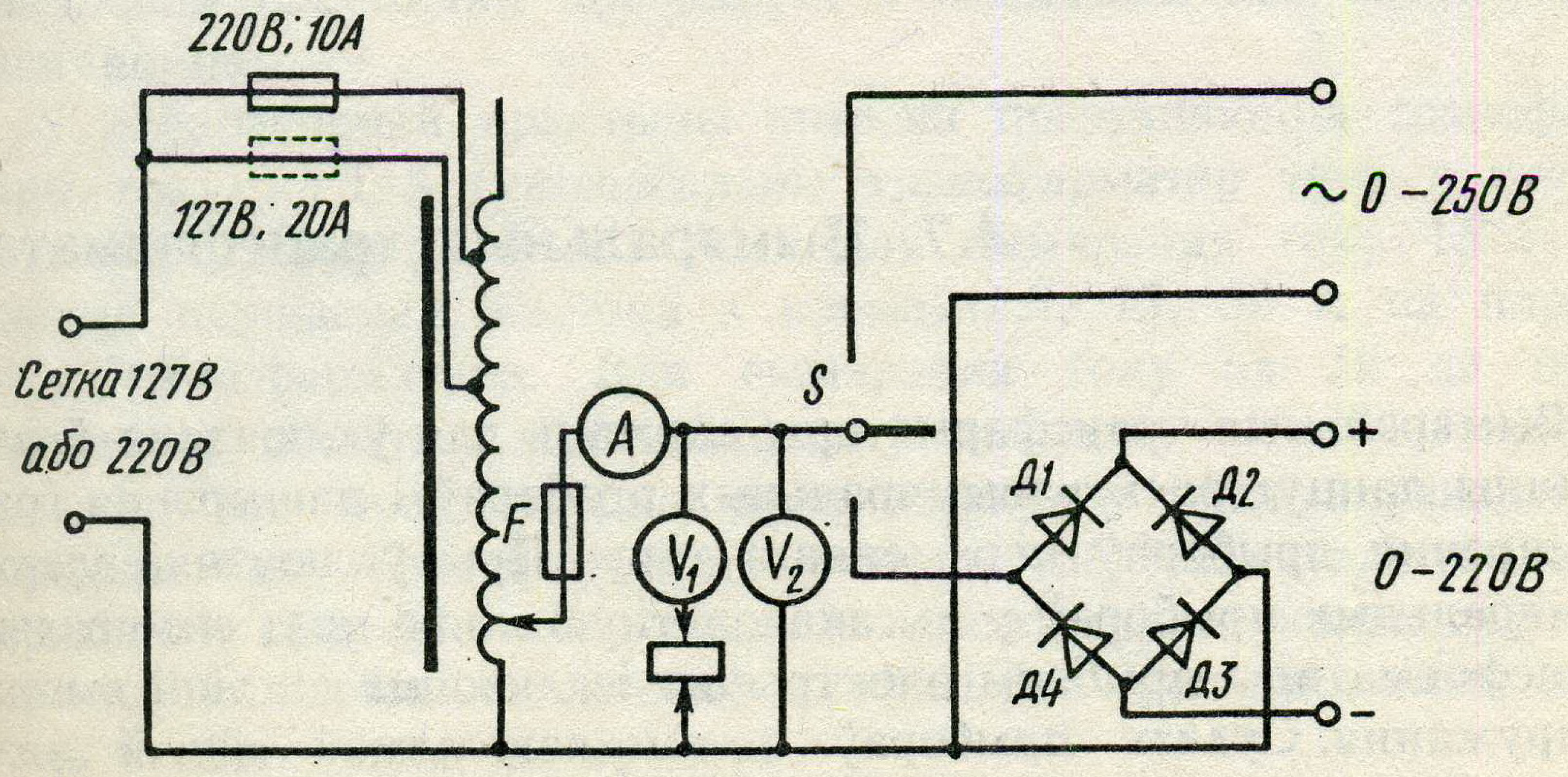
кантактам і вальтметрам электрамагнітнай сістэмы на 250 В (рыс. 4.10). Рэгулятар напружання можна падключаць у сетку 127 і 220 В. Выхадное напружанне рэгулюецца ад 0 да 250 В. Максімальны ток нагрузкі пры выхадным напружанні 140 В — 8 А, а пры выхадным напружанні 140—250 В — 6 А. Рэгулятар напружання прымяняецца ў лабараторнай практыцы інстытутаў і школ.



Рыс. 4.10. Схема рэгулятара напружання школьнага (РНШ)

Акрамя РНШ неабходным прыборам у лабараторыях інстытутаў і школ з'яўляецца рэгулятар напружання з выпрамнікам (РНШ-В), схема якога дадзена на рыс. 4.11. Рэгулятар напружання РНШ-В дае магчымасць плаўнага рэгулявання выхаднога пераменнага напружання частаты 50 Гц ад 0 да 250 В і выпрамленага напружання з частатой пульсацыі 100 Гц ад 0 да 220 В. Рэгулятар напружання РНШ-В складаецца з двух вузлоў — аўтатрансфарматара са слізготным кантактам і выпрамляльнага моста на крэмніевых дыёдах Д231, якія вытрымліваюць максімальнае адваротнае напружанне 300 В і прамы ток да 10 А. Рэгулятар напружання РНШ-В мае два вальтметры і адзін амперметр электрамагнітнай сістэмы, якія ўключаны паміж аўтатрансфарматарам і выпрамляльным мостам.

Вальтметр V_1 вымярае напружанне ад 0 да 50 В, а вальтметр V_2 — ад 60 да 250 В. У РНШ-В ёсць аўтаматычны пераключальнік вальтметраў, які пры дасягненні другаснага напружання аўтатрансфарматара 50 В адключае вальтметр V_1 і падключае



Рыс. 4.11. Схема рэгулятара напружання з выпрамнікам (РНШ-В)

V_2. Вальтметры і амперметр уключаны перад выпрамляльным мостам і вымяраюць напружанне і ток у ланцугу пераменнага току, але па іх паказаннях можна меркаваць пра значэнні выпрамленага току. На выхадзе рэгулятар напружання РНШ-В мае клемы пастаяннага і пераменнага напружання. Пераключэнне на выхад пастаяннага або пераменнага напружання ажыццяўляецца аднаполюсным пераключальнікам S. Рэгулятар РНШ-В забяспечаны аўтаматычным засцерагальнікам тыпу ПАР на максімальны ток 10 А.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зроблены аўтатрансфарматар?
2. Якія перавагі аўтатрансфарматара ў параўнанні з двухабмоткавым трансфарматарам?
3. Ад чаго залежыць ККД аўтатрансфарматара?
4. Якія недахопы мае аўтатрансфарматар?
5. Што такое разліковая магутнасць аўтатрансфарматара?
6. Як зроблены трохфазны аўтатрансфарматар?
7. Дзе прымяняюцца аўтатрансфарматары?
8. Аднафазны аўтатрансфарматар $S_н = 10$кВ·А з намінальным напружаннем 220/200 В мае ў першаснай абмотцы $w_1 = 220$ віткоў. Вызначце каэфіцыент трансфармацыі, лік віткоў другаснай абмоткі, токі ў першаснай і другаснай абмотках.

Адказ: $k = 1{,}1$; $w_2 = 200$ віткоў; $I_1 = 45{,}5$ А; $I_2 = 50$ А.

9. Другасная абмотка аўтатрансфарматара мае 500 віткоў і пранізваецца пераменным магнітным патокам $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Вызначце імгненнае значэнне ЭРС другаснай абмоткі, калі $\Phi_m = 15 \cdot 10^{-4}$ Вб, а частата току $f = 50$ Гц.

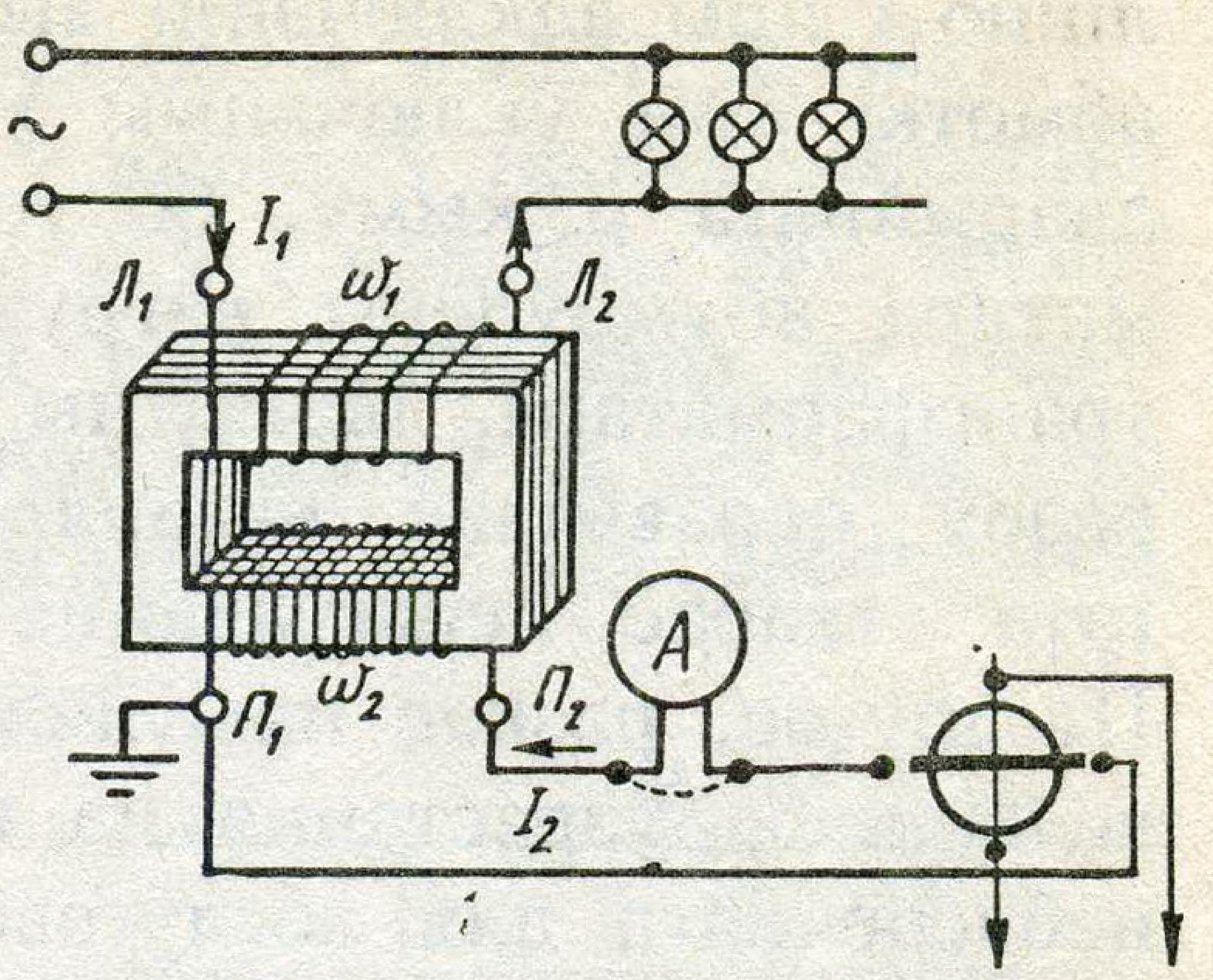
Адказ: $e_2 = 235{,}5 \cos \omega t$ В.

4.7. Вымяральныя трансфарматары

Вымяральныя трансфарматары служаць для ўключэння ў электрычны ланцуг электравымяральных прабораў і пашырэння граніц вымярэння прыбораў пераменнага току. Пры ўключэнні электравымяральных прыбораў у высакавольтную лінію праз вымяральныя трансфарматары прыборы электрычна ізалююцца ад лініі высокага напружання. Сувязь прыбораў з высакавольтнай лініяй ажыццяўляецца праз магнітапровад. Вымяральныя трансфарматары з'яўляюцца двухабмоткавымі трансфарматарамі з жалезным стрыж-

нем і па сваім прызначэнні падзяляюцца на трансфарматары току і напружання.

Т р а н с ф а р м а т а р т о к у (рыс. 4.12) з'яўляецца павышальным трансфарматарам і працуе ў рэжыме, блізкім да кароткага замыкання, бо другасная абмотка замыкаецца на амперметр або паслядоўныя абмоткі іншых прыбораў (ватметра, лічыльніка электраэнергіі, фазометра, токавых рэле і інш.). Для рэжыму кароткага замыкання



Рыс. 4.12. Схема ўключэння трансфарматара току ў ланцуг

$$I_1/I_2 = k \quad \text{або} \quad I_1 = kI_2,$$

дзе k — каэфіцыент трансфармацыі; I_2 — ток у амперметры; I_1 — ток у першасным ланцугу.

Значыць, па паказанні амперметра можна меркаваць аб значэнні току ў лініі. Трансфарматары току разлічаны на другасны ток 5 А, а першасныя токі могуць быць ад 5 да 15000 А.

Клемы для падключэння трансфарматара току ў разрыў лініі абазначаюцца літарамі $Л_1$ і $Л_2$, а клемы для падключэння вымяральных прыбораў (амперметра, токавых абмотак іншых прыбораў) — літарамі $П_1$ і $П_2$.

Па ступені дакладнасці трансфарматары падзяляюцца на 5 класаў у залежнасці ад хібнасці каэфіцыента трансфармацыі: 0,2; 0,5; 1; 3 і 10. Трансфарматары току бываюць стацыянарныя, пераносныя і для вымярэння току ў лініі без разрыву ў выглядзе абцугоў, па спосабу ізаляцыі — сухія, з фарфоравай або папяровай ізаляцыяй правадоў і з масляным або кампаўндным запаўненнем.

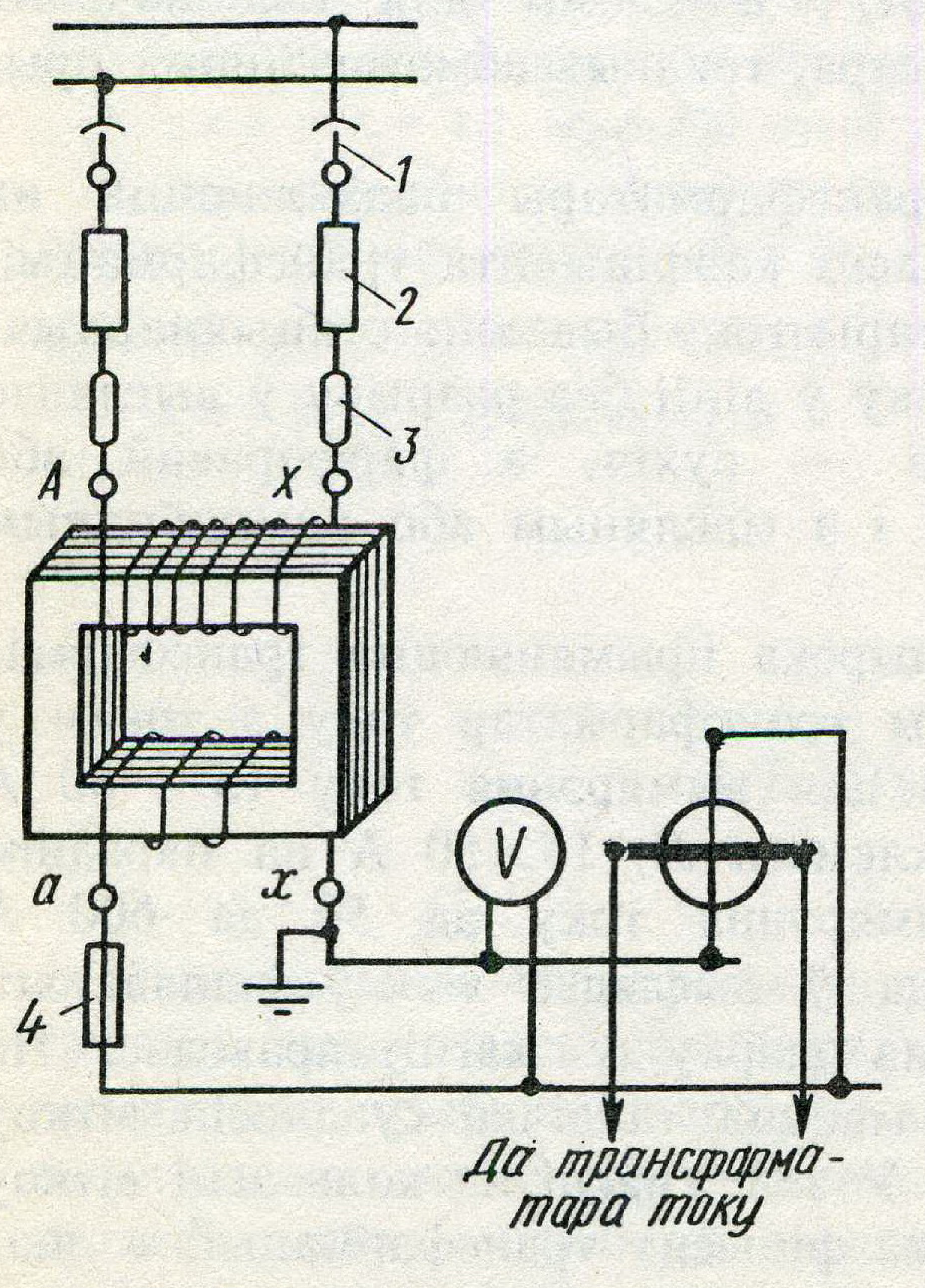
У лабараторнай практыцы шырока прымяняюцца трансфарматары току УТТ-5 (універсальны трансфарматар току з токам у другаснай абмотцы 5 А). У іх для вымярэння току 15 і 50 А маецца першасная абмотка з клемамі Л, 15, 50 А на пярэднім баку трансфарматара. Для вымярэння току ад 50 да 600 А першасная абмотка выконваецца ў выглядзе віткоў ізаляванага проваду, які прасоўваецца праз дзірку ў магнітаправодзе. На пярэднім баку трансфарматара маецца таблічка суадносін віткоў першаснай абмоткі і сілы току. У залежнасці ад колькасці віткоў першаснай абмоткі змяняецца каэфіцыент трансфармацыі, а значыць і пастаянная амперметра.

У трансфарматары маецца металічная скаба, якая служыць для кароткага замыкання клем ($П_1$, $П_2$) пры ўключэнні яго ў

лінію і пры адключэнні вымяральнага прыбора. Разрыў другаснай абмоткі пры ўключаным у лінію трансфарматары прыводзіць да аварыйнага рэжыму, бо ток I_1 у першаснай абмотцы трансфарматара абумоўлены нагрузкай сеткі і не залежыць ад нагрузкі трансфарматара. Магнітны паток ствараецца токам I_1 і ў шмат разоў перавышае намінальны магнітны паток трансфарматара, гэта стварае пераграванне і псаванне стрыжня трансфарматара. Па-другое, рэзкае павелічэнне магнітнага патоку ў стрыжні прыводзіць да ўзрастання на клемах другаснай абмоткі напружання, небяспечнага для абслуговага персаналу.

У вымяральных абцугах стрыжань расхінаецца і провад, у якім вымяраецца ток, абхопліваецца стрыжнем. Першаснай абмоткай з'яўляецца провад, які абхопліваецца стрыжнем, што адпавядае аднаму вітку. Другасная абмотка зроблена з некалькіх віткоў і падключаецца да амперметра.

Трансфарматар напружання прымяняецца для падключэння ў высакавольтную сетку вальтметраў, абмотак напружання ватметраў, лічыльнікаў электрычнай энергіі, фазометраў, частатамераў, рэле напружання, сігнальных лямпаў і інш. Падключэнне трансфарматара напружання ў сетку з вальтметрам і ватметрам паказана на рыс.4.13. Трансфарматар напружання з'ўляецца паніжальным і працуе ў рэжыме, блізкім да халастога ходу: $U_1/U_2 = k$ або $U_1 = kU_2$, дзе k — каэфіцыент трансфармацыі; U_2 — напружанне на вальтметры, падключаным да другаснай абмоткі; U_1 — напружанне ў сетцы. Значыць, па паказанні вальтметра можна меркаваць аб напружанні ў сетцы. Трансфарматары разлічаны на напружанне ў другаснай абмотцы 100 В. Па ступені дакладнасці яны падзяляюцца на чатыры класы ў залежнасці ад хібнасці каэфіцыента трансфармацыі: 0,2; 0,5; 1 і 3.

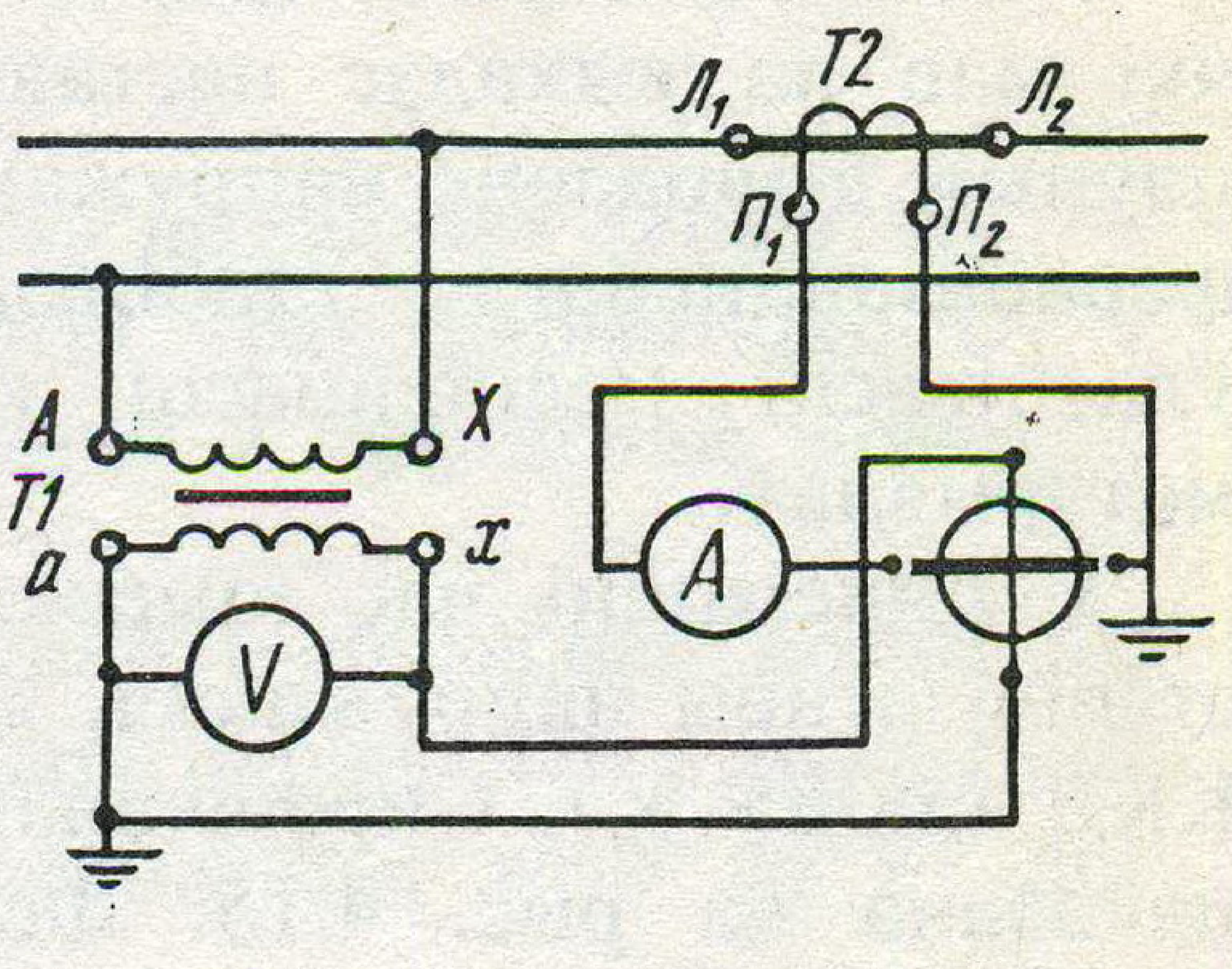


Рыс. 4.13. Схема ўключэння ў ланцуг вымяральнага трансфарматара напружання

Вымяральныя трансфарматары напружання бываюць аднафазныя і трохфазныя, а па спо-

сабу ахалоджвання — паветраныя і масляныя. Масляныя трансфарматары прымяняюцца ў сетках з напружаннем вышэй за 6 кВ.

Для бяспекі абслуговага персаналу ў выпадку прабою ізаляцыі высакавольтнай абмоткі другасную абмотку і масляны бак трансфарматара зазямляюць. Для засцярогі трансфарматара ад перагрузкі і кароткага замыкання ў другасную абмотку на незаземлены канец устанаўліваецца плаўкі засцерагальнік *4*. Каб засцерагчы высакавольтную сетку ад кароткага замыкання, у трансфарматары ўстанаўліваюцца высакавольтныя засцерагальнікі *3* і супраціўленні *2* для абмежавання току. Адключэнне трансфарматара ад высакавольтнай сеткі выконваецца з дапамогай раз'яднальніка *1*.



Рыс. 4.14. Схема ўключэння амперметра, вальтметра і ватметра ў ланцуг з дапамогай вымяральных трансфарматараў току і напружання

У лабараторнай практыцы карыстаюцца універсальным лабараторным трансфарматарам напружання тыпу УНТ-1. Схема ўключэння амперметра, вальтметра і ватметра ў сетку з дапамогай вымяральных трансфарматараў току і напружання прыводзіцца на рыс. 4.14.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Для чаго прызначаюцца вымяральныя трансфарматары і як яны класіфікуюцца?

2. Чаму трансфарматар току ўключаецца ў сетку як павышальны і працуе ў рэжыме кароткага замыкання?

3. Чаму вымяральны трансфарматар напружання ўключаецца ў сетку як паніжальны і працуе ў рэжыме, блізкім да рэжыму халастога ходу?

4. Ці прымяняюцца вымяральныя трансфарматары ў сетцы пастаяннага току?

5. Ватметр, які мае 150 дзяленняў з граніцамі току 5 А і напружання 150 В, падключылі ў ланцугу з дапамогай трансфарматара току клемамі Л і 15 А і дадатковым супраціўленнем 5 кОм у абмотцы напружання, паказаў 100 дзяленняў. Чаму роўная магутнасць у ланцугу?

Адказ: $P = 3$ кВт.

6. Уключаны ў сетку з дапамогай трансфарматара напружання 3000/100 В і трансфарматара току 100/5 А вальтметр паказаў $U_2 = 75$ В, амперметр $I_2 = 4$ А, ватметр $P_2 = 250$ Вт, лічыльнік за 5 гадз. $W_2 = 1{,}25$ кВт·гадз. Вызначце напружанне, ток, магутнасць у сетцы, спажыванне энергіі за 5 гадз. і $\cos\varphi$.

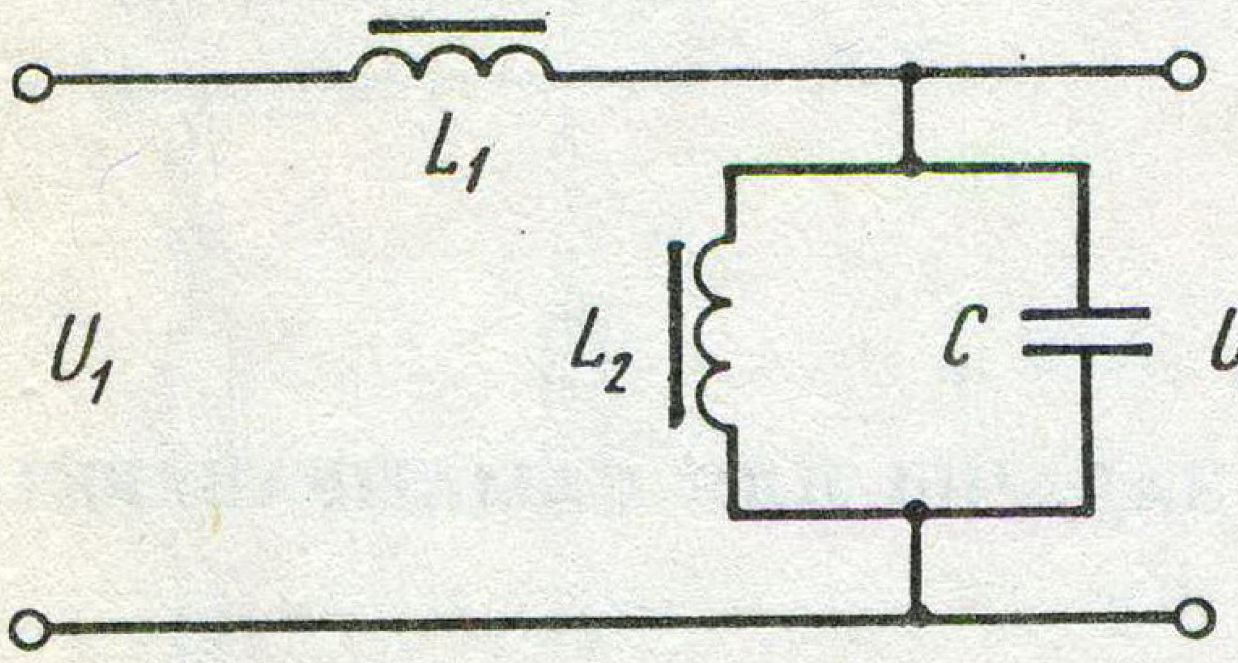
Адказ: $U_1 = 2250$ В; $I_1 = 80$ А; $P_1 = 150$ кВт; $W_1 = 750$ кВт·гадз.; $\cos\varphi = 0{,}83$.

4.8. Ферарэзанансны стабілізатар напружання

Пакольки напружанне сеткі вагаецца, у сістэме аўтаматыкі і выпрамляльных установках прымяняюцца стабілізатары напружання.

Стабілізатарам напружання называецца электрычны апарат, які мае на выхадзе пастаяннае напружанне U_2 пры змяненні ў пэўным дыяпазоне напружання на ўваходзе U_1. Прынцып дзеяння ферарэзананснага стабілізатара напружання грунтуецца на ўласцівасці нелінейнасці крывой намагнічвання фераматнітных матэрыялаў.

У цяперашні час шырока выкарыстоўваюцца ферарэзанансныя стабілізатары напружання, якія маюць вялікую магутнасць і высокі ККД (да 85 %). Спрошчаная схема ферарэзананснага стабілізатара паказана на рыс. 4.15. Ферарэзанансны стабілізатар складаецца з дроселя L_1 са стрыжнем вялікага сячэння і контура L_2C. Дросель L_1 у рабочым рэжыме далёкі ад магнітнага насычэння і з'яўляецца лінейным элементам ланцуга. Дросель L_2 контура мае малое сячэнне і ў рабочым рэжыме знаходзіцца ў становішчы магнітнай насычанасці, значыць з'яўляецца нелінейным элементам ланцуга. Адхіленне напружання сеткі ад намінальнага значэння выклікае змяненне току ў ланцугу, што прыводзіць да змянення падзення напружання на першым дроселі, а на дроселі контура не выяўляецца прыкметнага змянення напружання.



Рыс. 4.15. Схема ферарэзананснага стабілізатара

Такім чынам, змяненне напружання сеткі кампенсуецца змяненнем напружання на першым дроселі, а ў контуры напружанне застаецца стабільным.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Чаму ў ферарэзанансным стабілізатары контур настроены ў рэзананс на частату сеткі?

2. Чаму дросель контура L_2C мае стрыжань малога сячэння?

3. Чаму дросель, падключаны паслядоўна з контурам, мае стрыжань вялікага сячэння?

4. Як забяспечваецца стабільнасць здымаемага напружання пры ваганні ўваходнага напружання U_1?

4.9. Працейшы разлік трансфарматараў

Для разліку трансфарматара трэба мець выхадныя даныя: S_2 — намінальная магутнасць другаснай абмоткі трансфарматара; U_1 і U_2 — намінальныя напружанні першаснай і другаснай абмотак трансфарматара; f — частата сеткі.

Вызначаюць I_1 і I_2 — токі ў першаснай і другаснай абмотках трансфарматара; q_1 і q_2 — сячэнні правадоў першаснай і другаснай абмотак; S — сячэнне стрыжня трансфарматара; w_1 і w_2 — лік віткоў першаснай і другаснай абмотак.

1. Значэнне току ў першаснай і другаснай абмотках трансфарматара вызначаецца па наступных формулах:

$$I_1 = P/(U_1\,\eta\,\cos\varphi_1) \quad \text{і} \quad I_2 = S_2/U_2\,,$$

дзе P — актыўная магутнасць другаснай абмоткі ($P = S_2\cos\varphi_2$); η — ККД, значэнне якога для маламагутных трансфарматараў складае 0,7—0,93; $\cos\varphi$ вызначаецца па формуле

$$\cos\varphi_1 = I_{1a}/\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}\ ;$$

$I_{1a} = S_2/(\eta\,U_1)$; $I_{1p} = I_\mu S_2 \sin\varphi_2/(\eta U_1)$; I_μ — намагнічвальны ток.

Пры актыўнай нагрузцы трансфарматара $I_{1p} = I_\mu$, а $\cos\varphi_1$ можа быць вызначаны па формуле

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_\mu^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (I_\mu/I_{1a})^2}}\,.$$

На практыцы ўстаноўлена, што для аднафазных трансфарматараў пры актыўнай нагрузцы значэнне намагнічвальнага току I_μ складае 40—50 % актыўнага току I_{1a}. Пры змешанай актыўна-індуктыўнай нагрузцы ён крыху меншы.

Шчыльнасць току ў абмотках трансфарматараў залежыць ад магутнасці. У трансфарматарах магутнасцю да 100 В·А дапускаецца шчыльнасць току $j = 4{,}5-3{,}5$ А/мм^2, а ў трансфарматарах магутнасцю больш за 100 В·А j = 3,5—2,5 А/мм^2.

2. Калі ведаць токі I_1 і I_2 і дапушчальную шчыльнасць токаў, то можна вызначыць плошчу сячэння правадоў першаснай і другаснай абмотак (мм^2) :

$$q_1 = I_1/j_1 \quad \text{і} \quad q_2 = I_2/j_2 .$$

Канчатковае значэнне плошчы сячэння правадоў выбіраецца па бліжэйшых даных ДАСТа з табліцы.

3. Плошча папярочнага сячэння стрыжня трансфарматара (см^2) вызначаецца па формуле

$$S_c = C \sqrt{\frac{S_1^2 \alpha \cdot 10^2}{f B_c j}} ,$$

дзе $S_1 = U_1 I_1$ — магутнасць, якая спажываецца; $\alpha = m_c/m_м$ — стасунак масы сталі да масы медзі абмотак.

З вопыту ўстаноўлена: для аднафазных трансфарматараў α знаходзяцца ў межах $\alpha =$ 4,5—5,5, а для трансфарматараў з мінімальнай масай $\alpha = 2-3$.

Для трансфарматараў бранявога тыпу з электратэхнічнай сталі маркі Э41 і Э11 магнітная індукцыя $B_c = 1{,}2-1{,}3$ Т. Для трансфарматараў стрыжнёвага тыпу значэнне індукцыі ў стрыжні на 5—10 % меншае, чым у бранявых. Пастаянны каэфіцыент для трансфарматараў стрыжнёвага тыпу з круглымі катушкамі C = = 0,5, а з прамавугольнымі C = 0,6. Для трансфарматараў бранявога тыпу C = 0,7.

Поўнае папярочнае сячэнне стрыжня з улікам каэфіцыента запаўнення сячэння сталлю ($k_з$) вызначаецца па формуле $S'_c =$ = $S_c/k_з$, дзе $k_з$ — бярэцца з табл. 4.1.

Табліца 4.1

Таўшчыня ліста, мм	0,5	0,35	0,2	0,1
$k_з$	0,92	0,86	0,76	0,65
Ізаляцыя паміж лістамі	Лак	Лак	Лак	Лак

4. Лік віткоў першаснай абмоткі трансфарматара можна вызначыць з формулы ЭРС трансфарматара:

$$E_1 = 4{,}44 f B_c S_c \, w_1 \cdot 10^{-4} \text{, значыць, } w_1 = \frac{E_1 \cdot 10^4}{4{,}44 f B_c S_c} ,$$

дзе $E_1 \approx U_1$, а S_c выражаецца ў квадратных сантыметрах.

Лік віткоў другаснай абмоткі $w_2 = E_2/e_в$, дзе $e_в$ — ЭРС аднаго вітка пры нагрузцы трансфарматара: $e_в = \frac{E_1}{w_1}$, В/віток.

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Вывучэнне аднафазнага трансфарматара

Мэта работы: Вывучыць устройства і прынцып дзеяння аднафазнага трансфарматара. Навучыцца эксперыментальна вызначаць каэфіцыент трансфармацыі і ККД трансфарматара.

У выніку выканання лабараторнай работы студэнт павінен навучыцца вымяраць страты ў сталі ў вопыце халастога ходу трансфарматара, страты ў медзі ў вопыце кароткага замыкання трансфарматара; вызначаць каэфіцыент трансфармацыі і ККД трансфарматара пры розных нагрузках, аварыйны ток кароткага замыкання.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 4.1—4.4 падручніка.

1. Каэфіцыент карыснага дзеяння трансфарматара вызначаецца па формуле

$$\eta = \frac{\beta S_н \cos\varphi_2}{\beta S_н \cos\varphi_2 + \beta^2 P_м + P_{ст}},$$

дзе $S_н$ — намінальная магутнасць трансфарматара, якая ўказваецца ў пашпарце трансфарматара.

Без уліку страты ў трансфарматары можна запісаць $U_{1н}I_{1н} = U_{2н}I_{2н} = S_н$. Cos φ вызначаецца характарам нагрузкі трансфарматара, таму ў лабараторнай рабоце трэба падлічыць ККД трансфарматара для трох значэнняў: $\cos\varphi_1 = 0{,}4$; $\cos\varphi_2 = 0{,}6$; $\cos\varphi_3 = 1$.

2. Каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара вызначаецца з вопыту халастога ходу. Пры халастым ходзе трансфарматара $I_0 = (0{,}02-0{,}04)I_{1н}$, а падзенне напружання на актыўным і індуктыўным супраціўленнях можна ігнараваць. У другаснай абмотцы $I_2 = 0$, таму атрымаем $|U_1| = |E_1|$, а $U_2 = E_2$ і $k = U_1/U_2 = w_1/w_2$.

Выкананне работы

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 4.4 для даследавання халастога ходу трансфарматара.

2. Падключыце сабраны ланцуг у сетку і ўстанавіце ЛАТрам намінальнае напружанне. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1.

Табліца 1

Вымярэнні				Вылічэнні			
U_1, В	I_1, А	P_0, Вт	U_2, В	k	$\cos\varphi_1$	z_1, Ом	r_1, Ом

3. Вылічыце каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара, каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi$, поўнае і актыўнае супраціўленні трансфарматара.

4. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 4.5 для даследавання кароткага замыкання трансфарматара.

5. Устанавіце ЛАТрам намінальны ток у першаснай і другаснай абмотках трансфарматара. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2.

Табліца 2

Вымярэнні				Вылічэнні				
$I_{1н}$, А	$U_{1к}$, В	$P_м$, Вт	$I_{2н}$, А	$\cos\varphi$	r_1, Ом	r_2, Ом	$z_к$, Ом	$I_{1к}$, А

6. Вылічыце ток у другаснай абмотцы пры кароткім замыканні па формуле $I_2 = kI_1$ і параўнайце з паказаннем прыбора A_2.

Дапусцім, што страты ў медзі размеркаваны пароўну ў першаснай і другаснай абмотках. Вылічыце актыўныя супраціўленні абмотак r_1 і r_2, поўнае супраціўленне трансфарматара z і аварыйны ток кароткага замыканя $I_{1к}$.

7. Вылічыце ККД трансфарматара для $\cos \varphi_2 = 0{,}8$ пры $\beta_1 = 0{,}2$; $\beta_2 = 0{,}4$; $\beta_3 = 0{,}6$; $\beta_4 = 0{,}8$; $\beta_5 = 1$ і начарціце графік $\eta = f(\beta)$.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Што называецца халастым ходам трансфарматара?
2. Як эксперыментальна вызначыць каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара?
3. Што называецца кароткім замыканнем трансфарматара і як практычна вызначыць страты магутнасці ў медзі?
4. Чаму пры кароткім замыканні не ўлічваюцца страты магутнасці ў сталі?
5. Як практычна вызначыць ККД трансфарматара?
6. Што такое каэфіцыент нагрузкі і як ён вызначаецца?
7. Што такое аварыйны ток кароткага замыкання і як яго вызначыць?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 9

Вывучэнне трохфазнага трансфарматара

М э т а р а б о т ы: вывучыць устройства і прынцып дзеяння трохфазнага трансфарматара; навучыцца эксперыментальна вызначаць каэфіцыент трансфармацыі і каэфіцыент карыснага дзеяння трансфарматара.

Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен навучыцца рабіць разметку вывадаў абмотак, вызначаць лік віткоў першаснай і другаснай абмотак трансфарматара, каэфіцыент трансфармацыі і каэфіцыент карыснага дзеяння трансфарматара.

Тэарэтычныя звесткі

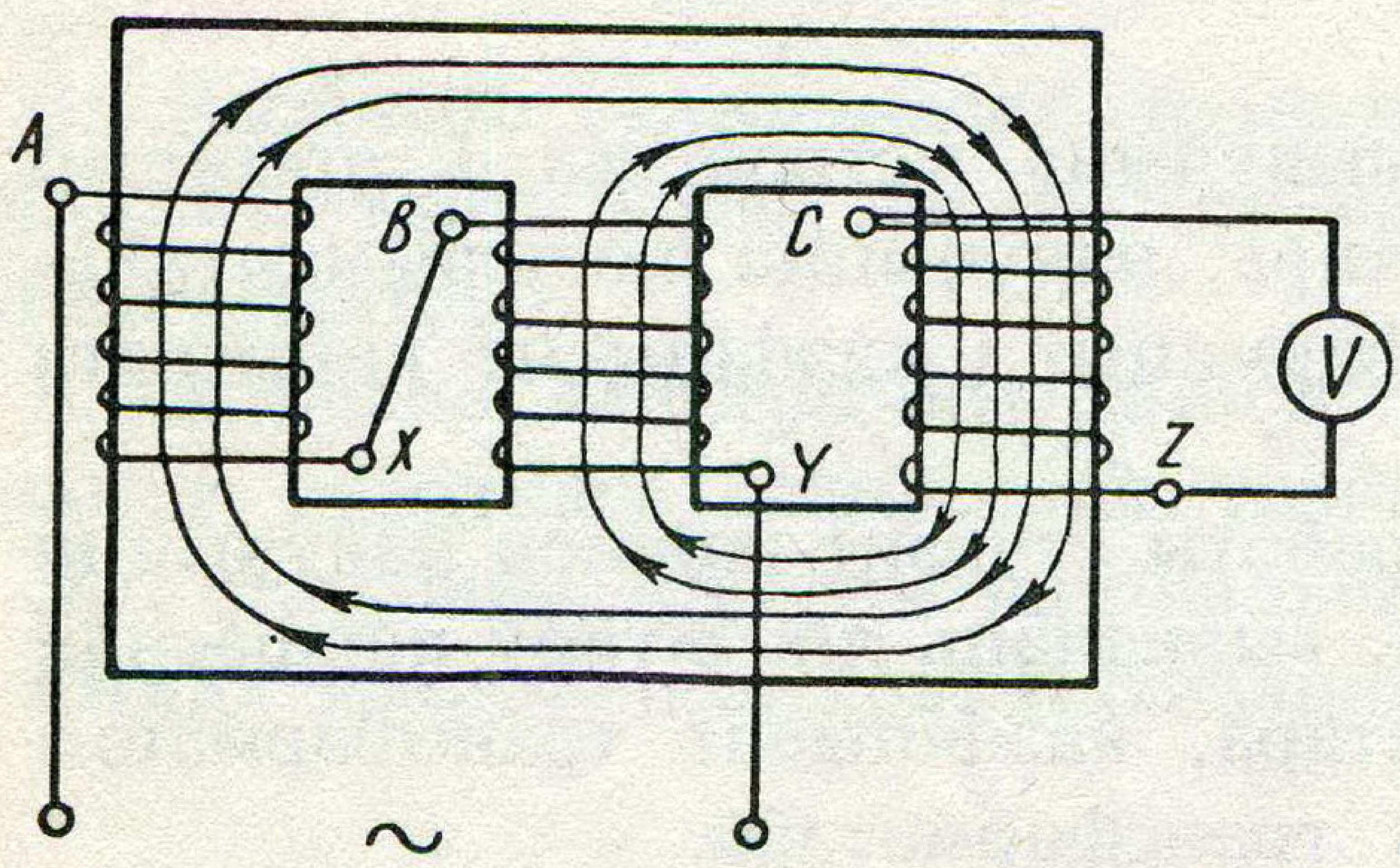
Вывучыце § 4.5 падручніка.

1. Вывады першаснай і другаснай абмотак можна вызначыць омметрам па супраціўленні. У паніжальных трансфарматарах першасныя абмоткі маюць большы лік віткоў і танчэйшы провад, значыць першасныя абмоткі маюць большае супраціўленне. Электрычным шляхам можна вызначыць першасныя і другасныя абмоткі і іх размяшчэнне на стрыжнях трансфарматара. Падключым адвольна адну абмотку пад напружанне 220 В і вымераем напружанні на вывадах усіх астатніх абмотак. Няхай атрымаем $U_1 = 110$ В,

$U_2 = 110$ В, $U_3 = 63$ В, $U_4 = 127$ В, $U_5 = 63$ В. Паколькі дзве абмоткі маюць адколькавыя напружанні, значыць яны знаходзяцца на крайніх стрыжнях, а ў сетку падключана першасная абмотка, размешчаная на сярэднім стрыжні, магнітны паток якой сіметрычна падзяліўся ў левы і правы стрыжні. Калі, напрыклад, напружанні будуць мець наступныя значэнні: $U_1 = 180$ В, $U_2 = 130$ В, $U_3 = 127$ В, $U_4 = 100$ В, $U_5 = 75$ В, то ў сетку падключана першасная абмотка, размешчаная на крайнім стрыжні, на якім знаходзіцца другасная абмотка з напружаннем 127 В.

2. Разметку вывадаў абмотак можна зрабіць наступным чынам. Вывады першаснай абмоткі на крайнім стрыжні абазначаюць *AX*. Далей лічаць, што адзін з вывадаў абмоткі на сярэднім стрыжні будзе *B*, а другі — *Y*. Злучаюць паміж сабой вывады *X* і *B*, а вывады *AY* падключаюць да сеткі 220 В. Калі стрэлка вальтметра, падключаная да трэцяй першаснай абмоткі, адхіліцца, то наша меркаванне пра вывады *B* і *Y* правільнае, а калі стрэлка вальтметра не адхіліцца, значыць меркаванне няправільнае: вывад *B* аказваецца вывадам *Y*, і наадварот, вывад *Y* — вывадам *B*.

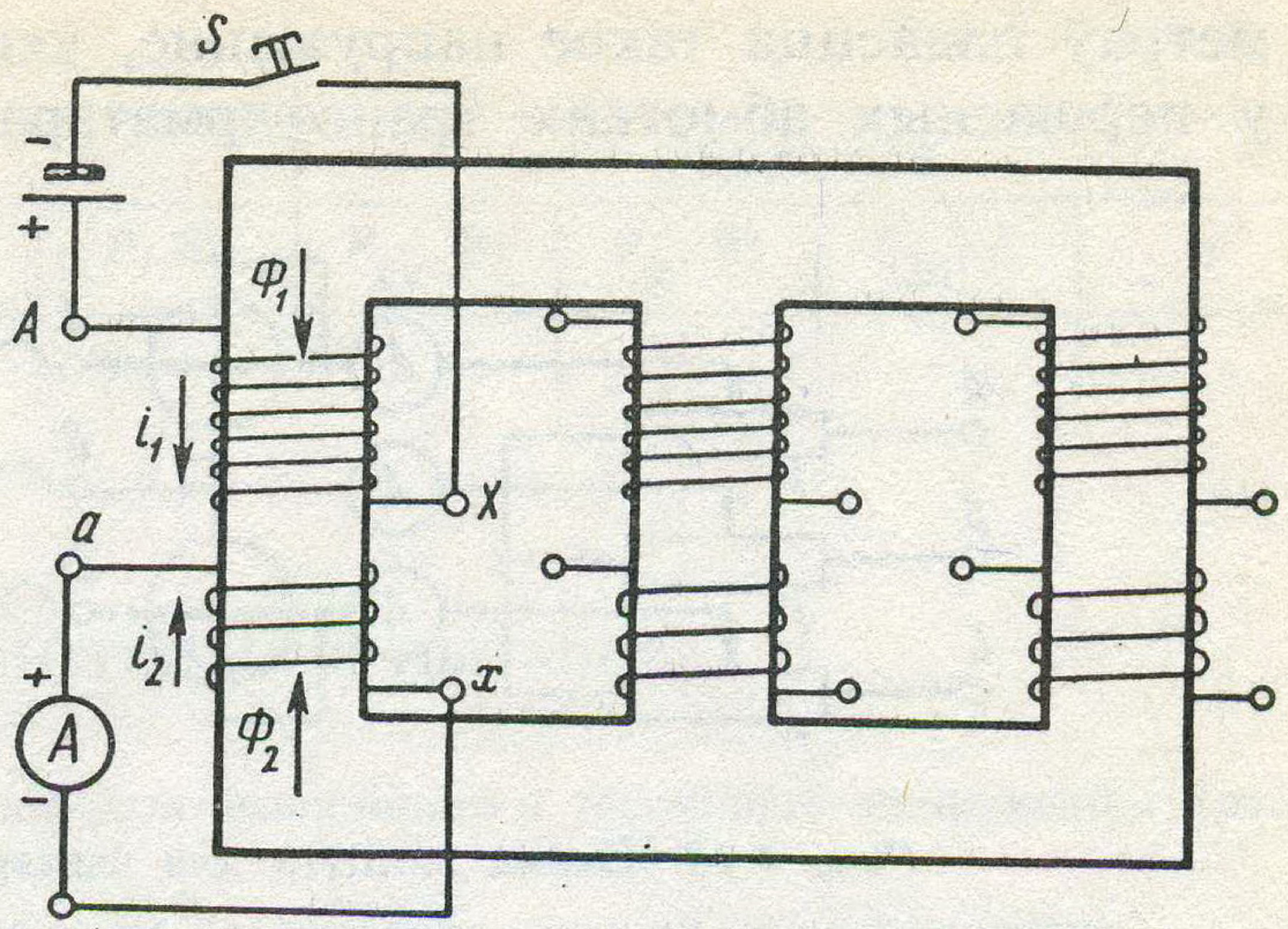
У першым выпадку магнітныя патокі першай і другой абмотак замыкаюцца праз трэці стрыжань і ўзбуджаюць у трэцяй абмотцы ЭРС (рыс. 4.16). У другім выпадку магнітныя патокі замыкаюцца праз першы і другі стрыжні. Аналагічна дзейнічаюць і для вызначэння вывадаў трэцяй абмоткі, падключаюць вальтметр да вывадаў абмоткі на сярэднім стрыжні.



Рыс. 4.16. Схема для разметкі вывадаў першаснай абмоткі трохфазнага трансфарматара

Вывады *ax* вызначаюцца метадам балістычнага штуршка (рыс. 4.17). Першасная абмотка *AX* падключаецца праз ключ да крыніцы пастаяннага току, а ў другасную абмотку *ax* падключаецца магнітаэлектрычны амперметр клемай «+» да мяркуемага вываду *a*. Калі ў момант замыкання ключа *S* першаснай абмоткі стрэлка амперметра адхіліцца ўправа, то наша меркаванне правільнае, а калі ўлева, то меркаванне няправільнае: вывад *a* аказваецца вывадам *x*, і наадварот, вывад *x* — вывадам *a*. Гэта тлумачыцца наступным чынам. Пры замыканні ключа *S* павялічваецца ток ад *A* да *X* у першаснай абмотцы, у другаснай абмотцы ў гэты момант па закону электрамагнітнай індукцыі ўзбуджаецца ток процілеглага напрамку ад *x* да *a* і стрэлка амперметра

робіць дадатнае адхіленне (управа) (рыс. 4.17). Разметка вывадаў b і y выконваецца аналагічна разметцы вывадаў першасных абмотак.



Рыс. 4.17. Схема для разметкі вывадаў *ax* метадам балістычнага штуршка

3. Для падліку віткоў першаснай і другаснай абмотак на сярэдні стрыжань на паверхню абмотак намотваюць 60—100 віткоў. Паключаюць першасную абмотку BY у сетку 220 В і вымяраюць напружанне на другаснай і дапаможнай абмотках. Паколькі напружанне ў абмотках прама прапарцыйна ліку віткоў, то маем

$$U_1/U_{\text{дап}} = w_1/w_{\text{дап}} \text{ або } w_1 = (U_1/U_{\text{дап}})60 \text{ і } w_2 = (U_2/U_{\text{дап}})60 .$$

4. Каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара вызначаецца стасункам лінейнага напружання першасных абмотак да лінейнага напружання другасных абмотак і залежыць ад групы (спосабу) злучэння абмотак. Пры злучэнні абмотак Y/Y і Δ/Δ $k = w_1/w_2$, пры Y/Δ $k = \sqrt{3}\, w_1/w_2$, а пры Δ/Y $k = w_1/(\sqrt{3}\, w_2)$.

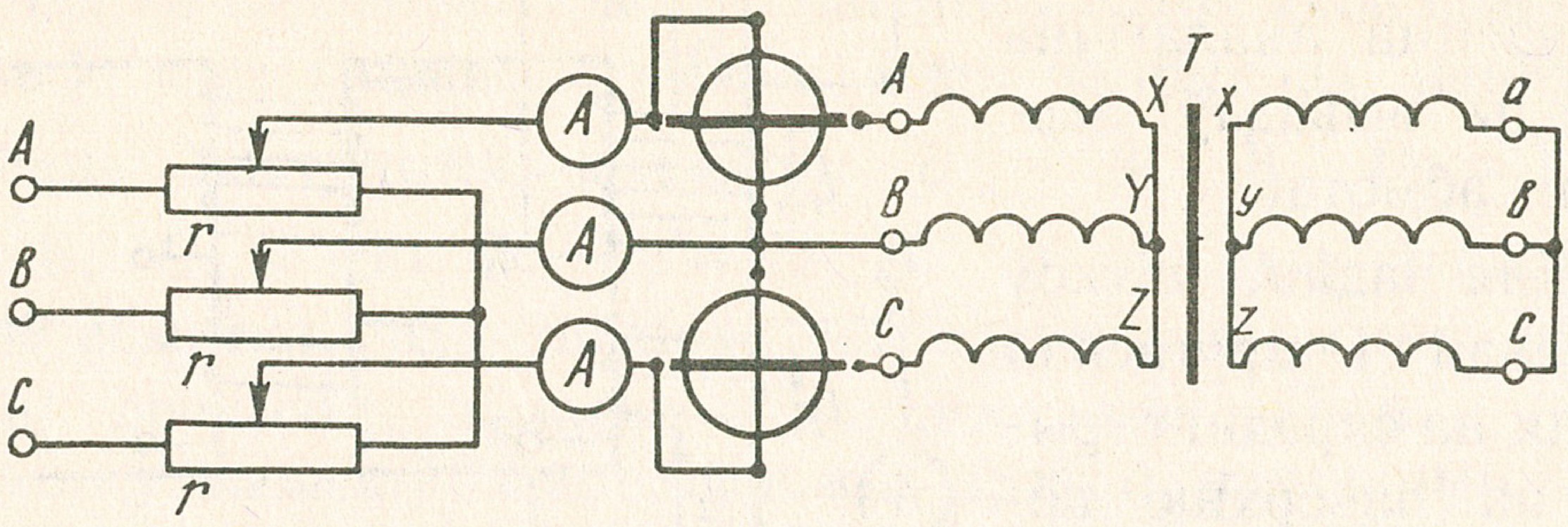
5. Каэфіцыент карыснага дзеяння вызначаецца па формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{м}} + P_{\text{ст}}},$$

дзе β — каэффіцыент нагрузкі трансфарматара; $S_{\text{н}} = \sqrt{3}\, U_{\text{н}} I_{\text{н}}$ — намінальная магутнасць трансфарматара, указаная ў пашпарце трансфарматара; $P_{\text{м}}$ — страты магутнасці ў медзі, якія вымяраюцца ватметрамі ў вопыце кароткага замыкання; $P_{\text{ст}}$ — страты магутнасці ў сталі, якія вызначаюцца ў вопыце халастога ходу трансфарматара па паказанні трохфазнага або аднафазнага ватметра, падключанага ў ланцуг першасных абмотак трансфарматара пры намінальным напружанні.

Для выканання вопыту кароткага замыкання трансфарматара першасныя і другасныя абмоткі трансфарматара злучаюцца зоркай і другасныя абмоткі замыкаюцца накаратка. На першасныя абмоткі з дапамогай трохфазнага рэгулятара напружання або патэнцыё-

метраў падаецца такое напружанне, якое стварае намінальны ток у першасных абмотках трансфарматара (рыс. 4.18).



Рыс. 4.18. Схема ланцуга для вымярэння страт у медзі

Выкананне работы

1. Вызначце першасныя і другасныя абмоткі трансфарматара.

2. Размецьце вывады першасных і другасных абмотак трансфарматара.

3. Вызначце лік віткоў першаснай і другаснай абмотак трансфарматара.

4. Вызначце каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара для наступных груп злучэння: Y/Y; Y/Δ ; Δ/Y ; Δ/Δ . Вымярэнні і вылічэнні велічыняў запішыце ў табл. 1.

Т а б л і ц а 1

Спосаб злучэння абмотак	Вымярэнні			Вылічэнні			
	$U_{л1}$, В	$U_{л2}$, В	$w_{дап}$	w_1	w_2	$w_1 : w_2$	k

5. Вымерайце з дапамогай аднафазных або трохфазнага ватметраў страты магутнасці ў сталі ў вопыце халастога ходу трансфарматара.

6. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 4.18 і вымерайце страты ў медзі ў вопыце кароткага замыкання. Устанавіце рэгулятарам напружання або патэнцыёметрам намінальныя токі ў першасных абмотках трансфарматара. Паказанні прыбораў і вылічэнні велічыняў запішыце ў табл. 2.

7. Вызначце каэфіцыент карыснага дзеяння трансфарматара для $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0,7$ пры $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Т а б л і ц а 2

Вымярэнні				Вылічэнні			
I_A, А	I_B, А	I_C, А	P, Вт	$P_{ст}$, Вт	$P_м$, Вт	$I_{2н}$, А	η

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Як вызначыць вывады абмотак вышэйшага і ніжэйшага напружання трансфарматара?

2. Як вызначыць вывады абмоткі на сярэднім стрыжні трансфарматара?

3. Як падлічыць лік віткоў першаснай і другаснай абмотак трансфарматара?

4. Як выканаць разметку вывадаў першаснай і другаснай абмотак трансфарматара?

5.Ад чаго залежыць каэфіцыент трансфармацыі трохфазнага трансфарматара і як яго вызначыць?

6. Як вызначыць ККД трохфазнага трансфарматара пры рознай нагрузцы?

5

НЕЛІНЕЙНЫЯ ЭЛЕМЕНТЫ ЛАНЦУГА. ВЫПРАМНІКІ

5.1. Нелінейныя элементы ў ланцугу пераменнага току

Пры наяўнасці ў ланцугу пераменнага току нелінейнага элемента ток нелінейна залежыць ад напружання.

Усе металічныя праваднікі ў пэўнай ступені з'яўляюцца нелінейнымі элементамі, бо пры праходжанні току яны награваюцца, а пры награванні змяняецца іх супраціўленне.

Магнітны паток у стрыжні дроселя і трансфарматара таксама нелінейна залежыць ад току ў абмотках. Існуюць сіметрычныя і несіметрычныя характарыстыкі нелінейных элементаў. Для нелінейных элементаў з сіметрычнай характарыстыкай адносна пачатку каардынат можна запісаць:

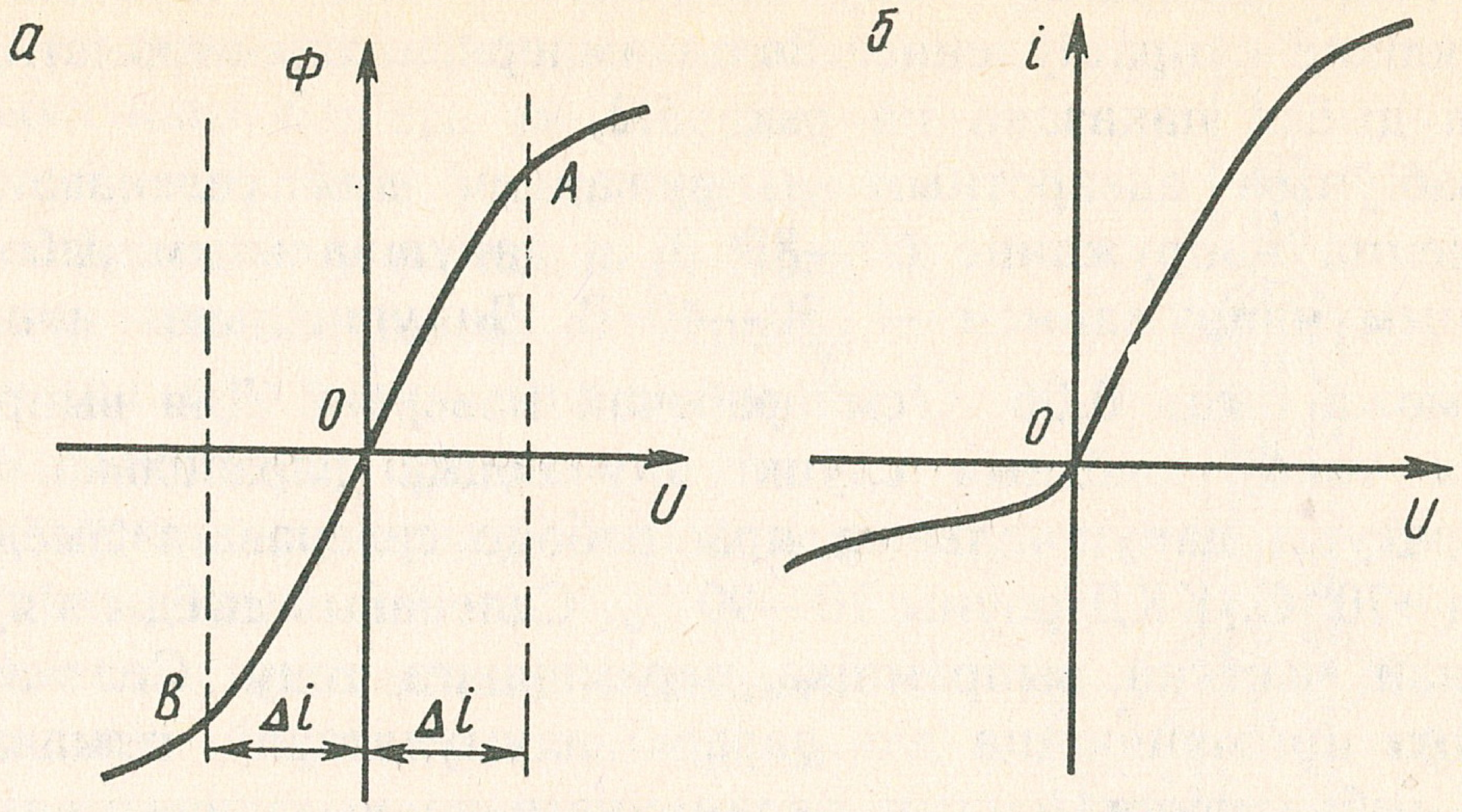
$$\Phi(i) = -\Phi(i);\ i(u) = -i(-u);\ Q(u) = Q(-u),$$

дзе Φ — магнітны паток; i — ток; Q — колькасць цеплаты.

У ланцугах пераменнага току рэактыўнымі нелінейнымі элементамі з сіметрычнай характарыстыкай з'яўляюцца дроселі, трансфарматары і кандэнсатары з сегнетадыэлектрыкамі (рыс. 5.1, *а*).

Актыўныя нелінейныя элементы бываюць з сіметрычнымі і несіметрычнымі характарыстыкамі. Актыўнымі нелінейнымі элементамі з несіметрычнымі характарыстыкамі з'яўляюцца паўправадніковыя дыёды, якія шырока прымяняюцца ў выпрамніках пераменнага току (рыс. 5.1, *б*).

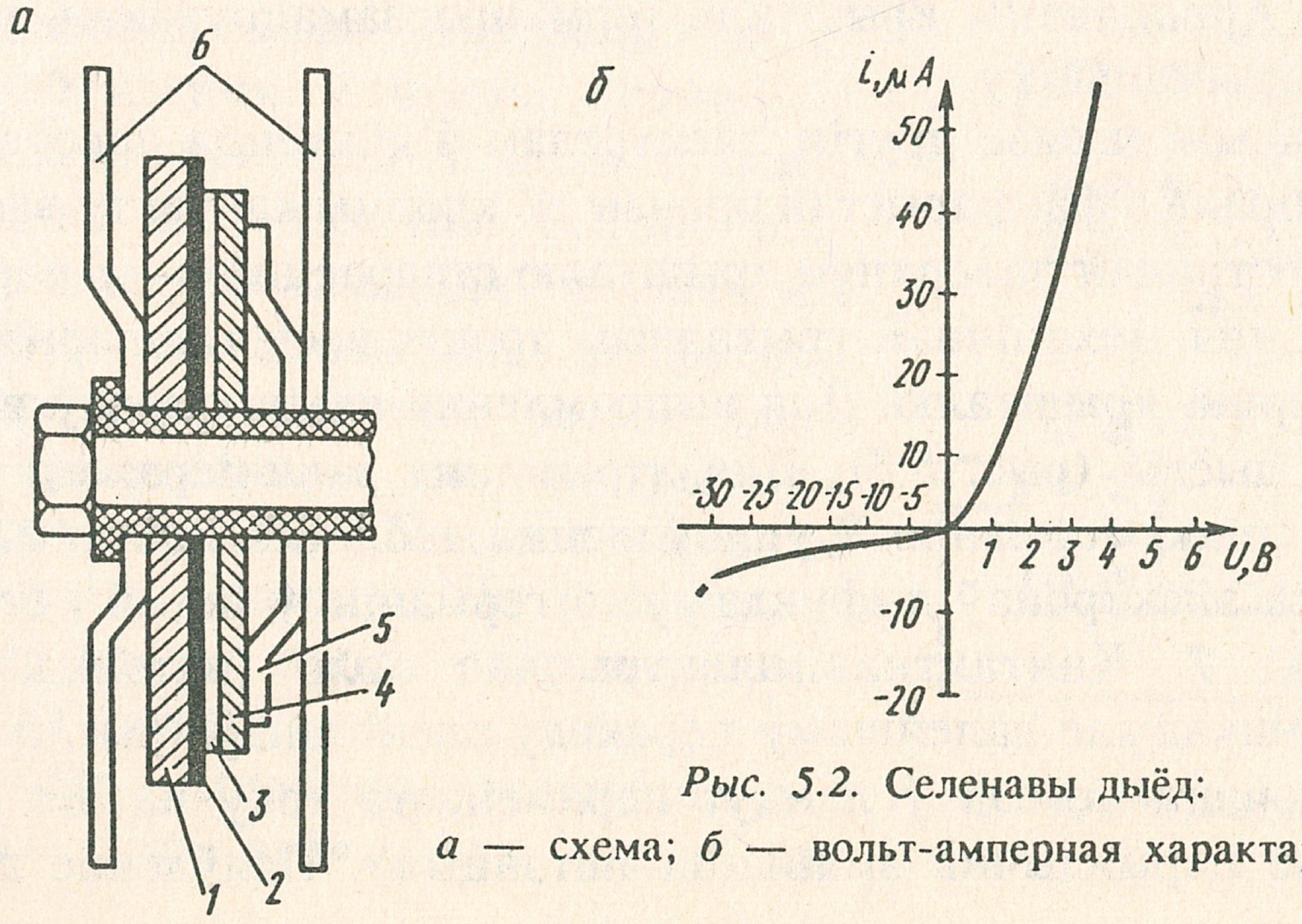
Пры сплаўленні двух паўправаднікоў розных тыпаў на граніцы спаю ствараецца зачыняльны слой (p—n-пераход), здольны прапускаць ток у адным кірунку, уладае аднабаковай праводнасцю. Паўправадніковы прыбор з адным p—n-пераходам, які мае два вывады, называецца *паўправадніковым дыёдам*. Да іх адносяцца



Рыс. 5.1. Характарыстыкі нелінейных элементаў:
а — сіметрычная; *б* — несіметрычная

купрасны (Cu), селенавы (Se), германіевы (Ge), крэмніевы (Si) і арсенідгаліевы (GeAs) дыёды. Купрасны дыёд цяпер на практыцы не прымяняецца.

С е л е н а в ы д ы ё д (рыс. 5.2, *а*) складаецца з алюмініевага дыска *1*, пакрытага селенам *2*, на які наносіцца сплаў волава, кадмію і вісмуту *4*. Паміж селенам, які мае дзірачную праводнасць, і сплавам утвараецца зачыняльны слой *3* з *p—n*-пераходам. Селенавыя дыёды ў слупок сціскаюцца стрыжнёвым балтом, які ізаляваны ад элементаў выпрамніка эбанітавай утулкай і шайбай. Для лепшага ахалоджвання дыёдаў у слупку прымяняюцца радыятарныя дыскі, вентылятарныя *5* і спружынныя *6* шайбы, размешчаныя паміж дыёдамі. У селенавым дыёдзе зачыняльны слой прапускае электроны ад сплаву да селену, а напрамкам току трэба лічыць ад селену да сплаву. Пры



Рыс. 5.2. Селенавы дыёд:
а — схема; *б* — вольт-амперная характарыстыка

адваротным напрамку току зачыняльны слой селенавага дыёда мае вялікае супраціўленне. Вольт-амперная характарыстыка селенавага дыёда паказана на рыс. 5.2, *б*.

Прабіўным адваротным напружаннем для селенавага дыёда з'яўляецца напружанне 60—80 В, а дапушчальным рабочым адваротным напружаннем — 30—40 В. Дапушчальная шчыльнасць току можа быць 0,06 А/см^2 рабочай паверхні. Для выпрамлення вялікіх токаў дыёдныя слупкі злучаюцца паралельна. Граніцы тэмпературы дапушчальныя пры рабоце селенавага дыёда — ад −40 да +70° С. ККД роўны 70—90 %. Селенавыя дыёды з'яўляюцца асноўнай часткай выпрамніка пераменнага току. Селенавыя выпрамнікі прымяняюцца для зарадкі акумулятараў, сілкавання абмотак узбуджэння машын пераменнага току, сілкавання абмотак электрамагнітаў і інш.

У маркіроўцы селенавых слупкоў першыя тры літары АВС абазначаюць, што селенавы дыёд на алюмініевай аснове. Першы лік за літарамі ўказвае плошчу або дыяметр дыска ў міліметрах, а наступны лік — нумар, прысвоены гэтаму дыёду. У маламагутных дыёдах першы лік пасля літар паказвае значэнне выпрамленага току ў міліамперах, а другі — значэнне пераменнага напружання (АВС-6-270).

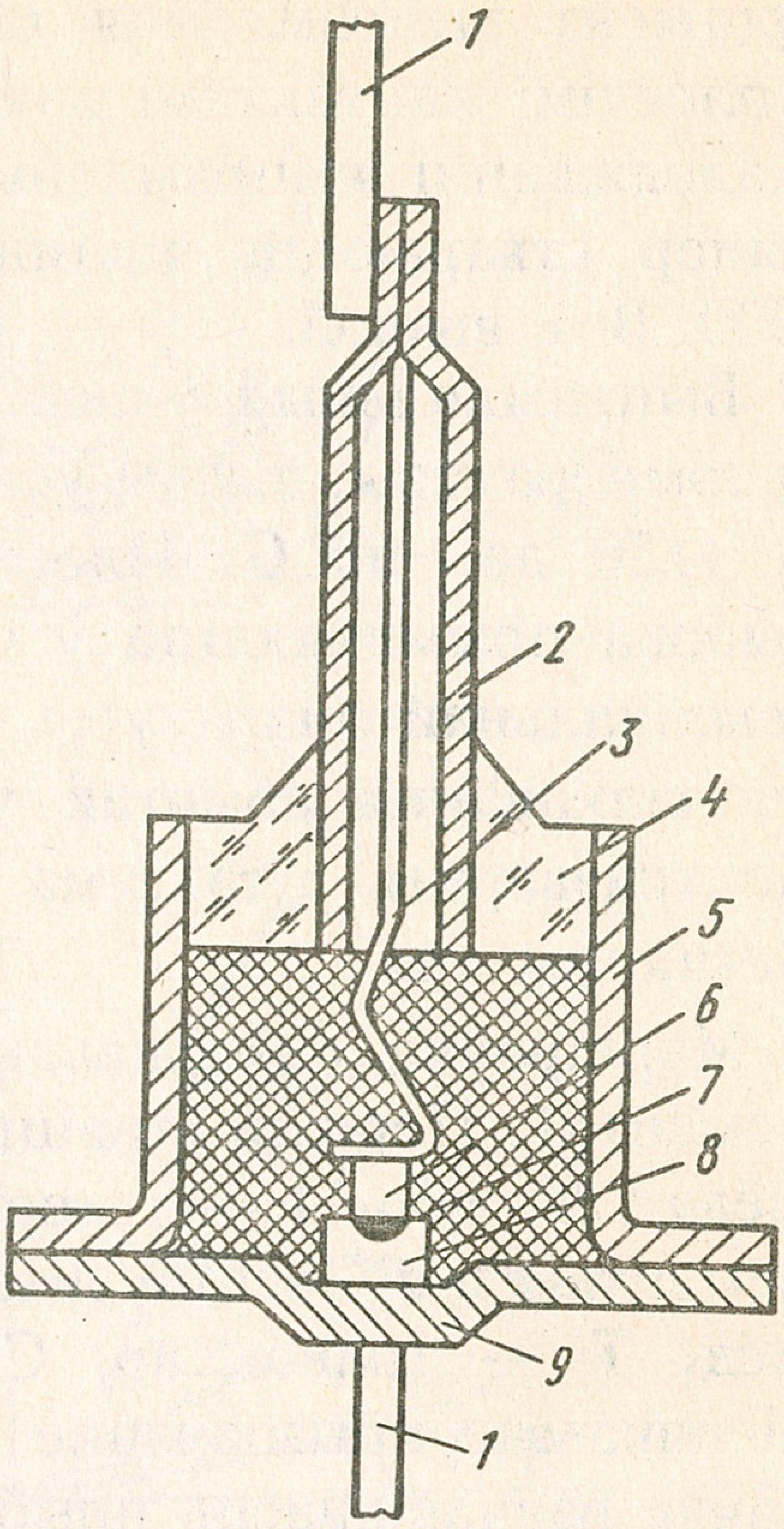
Германіевыя і крэмніевыя дыёды падзяляюцца на кропкавыя і плоскасныя. Для вырабу германіевых дыёдаў прымяняюцца германій з электроннай праводнасцю. Для атрымання электроннай праводнасці да чыстага германію дабаўляюць некалькі долей працэнта сурмы, фосфару або мыш'яку. Атрыманы германій *n*-тыпу разразаюць на тонкія пласцінкі плошчаю каля 2 мм^2. Адзін бок пласцінак (крышталяў) шліфуюць, паліруюць да люстранай паверхні і падвяргаюць траўленню. Апрацаваны крышталь германію замацоўваюць у спецыяльным трымальніку.

У кропкавым дыёдзе другім электродам з'яўляецца завостраная драцяная спіраль з фасфарыстай бронзы. У кропцы кантакту вастрыя дроціка з люстранай паверхняй крышталю ствараецца *p*—*n*-пераход. Для павышэння механічнай трываласці дроцік вастрыём прыварваюць да паверхні крышталю. Для выпрамлення вялікіх токаў робяць плоскасныя дыёды (рыс. 5.3). Для атрымання *p*—*n*-перахода ў паверхню пласцінкі германію *8* уплаўляецца таблетка індыю *6*. Пры гэтым частка электронаў дыфундзіруе з германію ў індый і стварае *p*—*n*-пераход *7*. Кантактнае электрычнае поле (патэнцыяльны бар'ер) перашкаджае далейшаму пераходу электронаў (рыс. 5.4, *а*). Пры падключэнні дыёда ў ланцуг пераменнага току на яго электродах будзе перыядычна змяняцца патэнцыял. Паяўленне дадат-

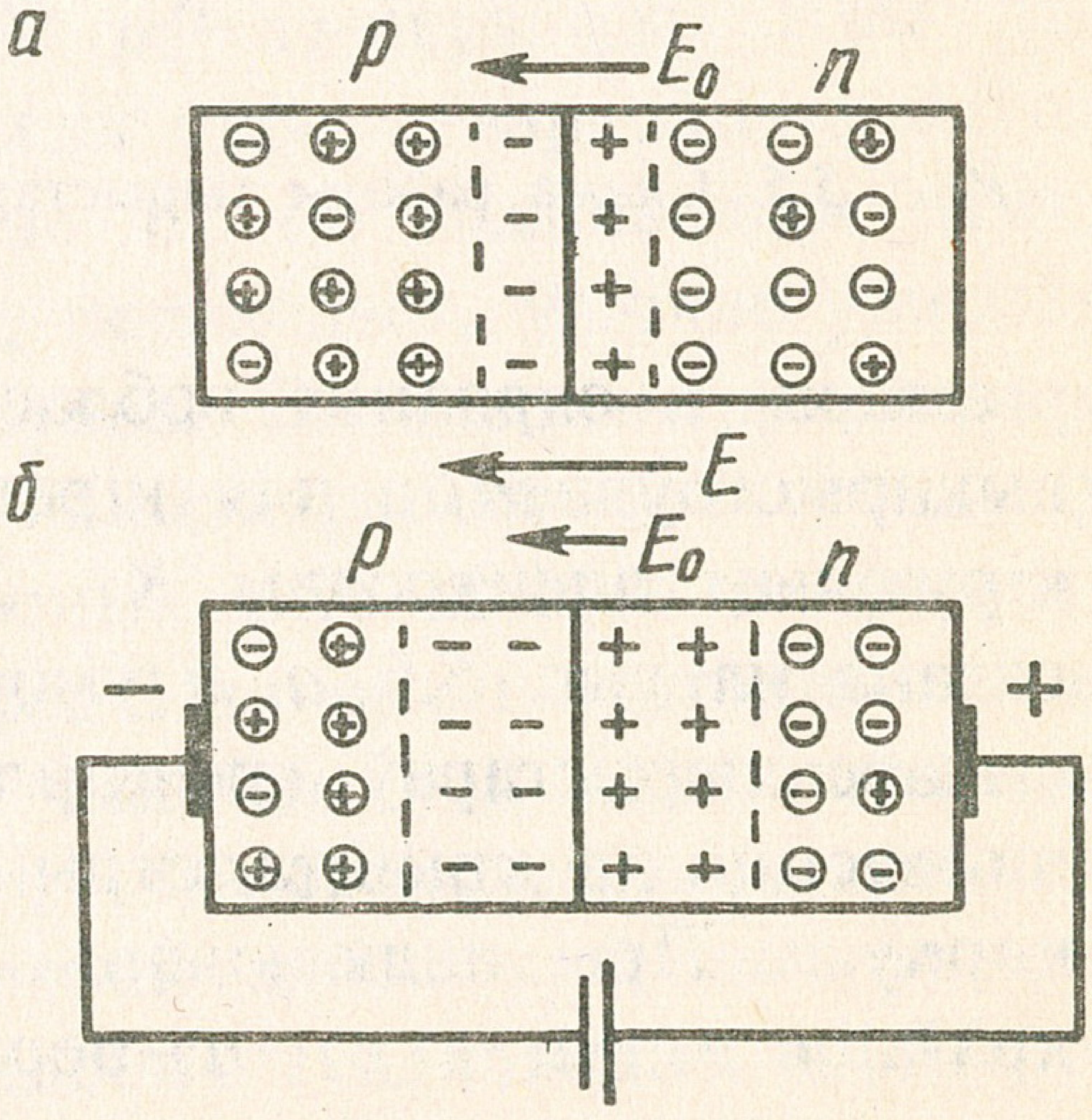
ковага патэнцыялу на індыі, а адмоўнага на германіі змяншае шырыню патэнцыяльнага бар'ера *p—n*-перахода, і электроны лёгка будуць пераходзіць з вобласці *n* у вобласць *p*. Праз паўперыяд патэнцыялы на электродах памяняюцца, што павялічыць шырыню патэнцыяльнага бар'ера *p—n*-перахода, і рух электронаў праз *p—n*-пераход рэзка ўпадзе (рыс. 5.4, *б*).

Наяўнасць плоскаснага кантакту паміж індыем і германіем дае магчымасць атрымаць выпрамлены ток да 50 А пры паветраным ахалоджванні і да 500 А пры вадзяным. ККД германіевых выпрамнікаў складае 97—98 %. Адваротнае напружанне можа быць 400 В і вышэй. Германіевыя дыёды з плоскаснымі кантактамі маюць вялікую ўласную ёмістасць і прымяняюцца для выпрамлення току з частатой не вышэй 50 Гц.

Недахопам германіевых выпрамнікаў з'яўляецца вузкі тэмпературны інтэрвал работы (−60— +85° С). Крэмніевыя дыёды па ўстройству мала адрозніваюцца ад германіевых. Для атрымання крэмніевых дыёдаў прымяняецца крэмній з дзіркавай праводнасцю, якая ўтвараецца шляхам дабаўлення ў чысты крэмній у час плаўлення долі працэнта бору, алюмінію або берылію. Злітак распілоўваецца на пласцінкі таўшчынёй 0,35—0,8 мм. Адзін бок шліфуецца да люстранай паверхні, потым пласцінкі праграваюцца на паветры пры тэмпературы 1000 °С для атрымання слою аксіду крэмнію. На шліфавальную паверхню наплаўляецца алюміній, а на адваротную — свінец. Паміж алюмініем і крэмніем утвараецца *p—n*-пераход, які забяспечвае высокі ка-



Рыс. 5.3. Схема германіевага дыёда:
1 — знешнія кантакты; *2* — трубка; *3* — кантактная спружына; *4* — шкляны ізалятар; *5* — герметычны корпус; *6* — таблетка індыю; *7* —*p—n*-пераход; *8* — крышталь германію; *9* — крышталетрымальнік

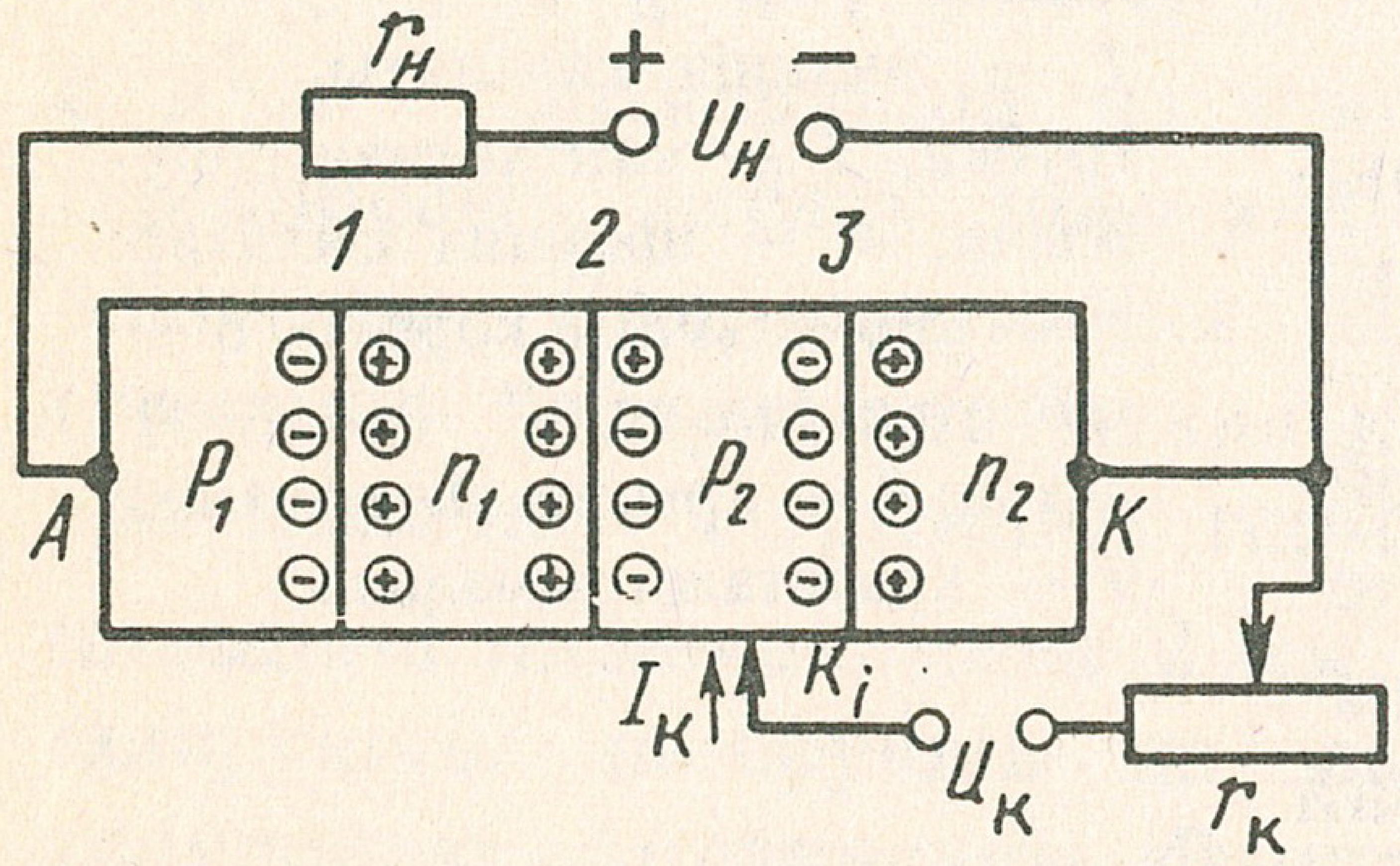


Рыс. 5.4. Схема работы германіевага дыёда

эфіцыент выпрамлення (да 10^8). Сілавыя крэмніевыя выпрамнікі з плоскімі кантактамі даюць магчымасць атрымаць пры вадзяным ахалоджванні выпрамлены ток да 500 А пры напружанні 100 В. Цяпер ствараюцца крэмніевыя дыёды на прабіўное напружанне 5000 В і вышэй.

Выпрамляльныя ўласцівасці крэмніевых дыёдаў мала залежаць ад тэмпературы, дыёды ўстойліва працуюць у дыяпазоне тэмператур ад +150 да −60° С. Плоскасныя германіевыя і крэмніевыя дыёды шырока прымяняюцца ў радыётэхніцы, аўтаматыцы, вымяральнай і вылічальнай апаратуры, а таксама ў машынах пераменнага току для сілкавання абмотак узбуджэння, у электралітычных ваннах, электразварцы, а таксама ў іншых устаноўках, дзе патрэбны вялікі пастаянны ток.

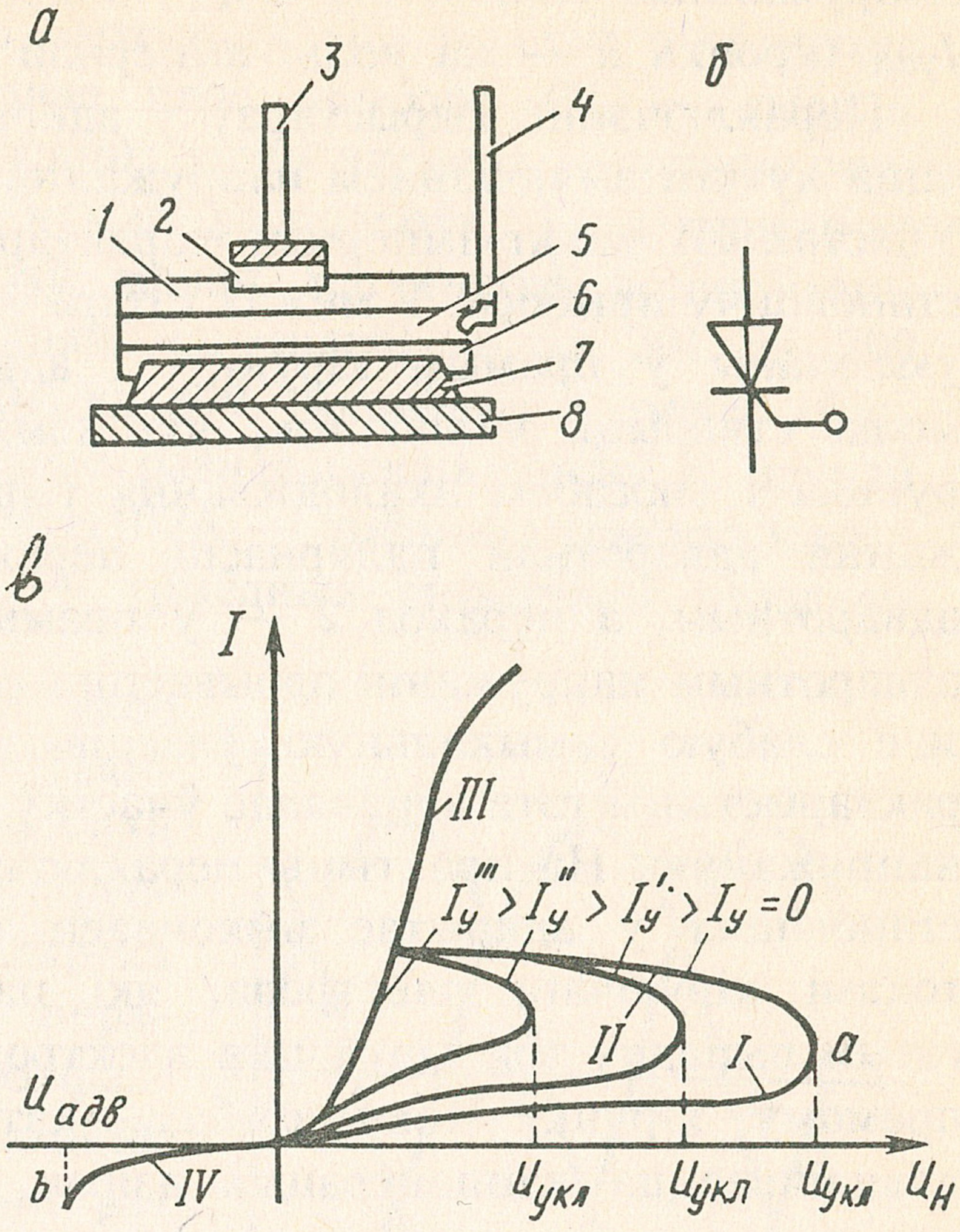
Маркіроўка паўправадніковых прыбораў складаецца з чатырох элементаў. Першай ставіцца літара або лік, які абазначае матэрыял дыёда (Г або 1 — германій, К або 2 — крэмній). Другім элементам з'яўляецца літара, якая абазначае клас прыбора (Д — дыёд, Т — транзістар, С — стабілітрон і г. д.); трэцім — лік, які паказвае прызначэнне прыбора; чацвёртым — літара, якая абазначае разнавіднасць прыбора гэтага класа. Напрыклад, 2Д104А — крэмніевы выпрамляльны дыёд, разнавіднасць тыпу А.



Рыс. 5.5. Схема работы тырыстара

Тырыстарам называецца кіруемы паўправадніковы (крэмніевы) дыёд. Тырыстар складаецца з чатырох зон з $p—n$-пераходамі (рыс. 5.5), якія паслядоўна чаргуюцца. Да крайняга p_1-слою падключаецца анод крыніцы пастаяннага току, які называецца анодам A тырыстара, да крайняга n_2-слою — катод, які называецца катодам K тырыстара, а сярэдняя вобласць называецца базай. База тырыстара выкарыстоўваецца для кіравання работай тырыстара і называецца кіруючым электродам K_1. Устройства тырыстара схематычна паказана на рыс. 5.6, *а*, а ўмоўнае абазначэнне — на рыс. 5.6, *б*. Пры вырабе тырыстараў крышталь са структурай $p—n—p—n$-тыпу прыпайваецца да крышталетрымальніка і герметызуецца ў металічным корпусе. Пры падключэнні крыніцы пастаяннага напружання два крайнія p_1-n_1 і p_2-n_2-пераходы ўключаны ў прамым кірунку і не ствараюць вялікага супраціўлення, а сярэдні n_1-p_2-пераход уключаны ў адваротным кірунку і ставарае вялікае супраціўленне —

тырыстар зачынены. Гэта аналагічна падключэнню адваротнага напружання на дыёд. Праз тырыстар праходзіць ток, роўны адваротнаму току. Значэнне гэтага току мала змяняецца са змяненнем напружання $U_н$ (участак I вольт-ампернай характарыстыкі тырыстара (рыс. 5.6, *в*)). Пры пабудове вольт-ампернай характарыстыкі тырыстара на восі *x* адкладваецца напружанне паміж анодам і катодам, а на восі *y* — ток, які праходзіць праз тырыстар.



Рыс. 5.6. Трыёдны тырыстар:
а — схема; *б* — умоўнае абазначэнне; *в* — вольт-амперная характарыстыка; *1* — вобласць n_1 ; *2* — вобласць P_1 ; *3* — вывад анода; *4* — вывад кіруючага электрода; *5* — вобласць P_2 ; *6* — вобласць n_2 ; *7* — крышталетрымальнік; *8* — вывад катода

Тэрмін «тырыстар» складаецца з двух слоў: грэчаскага слова «тыра» — дзверы і англійскага «рэзістар» — супраціўленне. Адкрыць n_1-p_2-пераход можна шляхам павелічэння асноўнага напружання $U_н$ або падвядзеннем кіруючага пастаяннага або імпульснага току ў прамым кірунку p_2-n_2-перахода. Пры павелічэнні напружання $U_н$ на n_1-p_2-пераходзе ствараецца вялікая рознасць патэнцыялаў (дзіркі ў базе n_1 не паспяваюць нейтралізавацца і накопліваюцца ў n_1-p_2-пераходзе), узнікае ўдарная іанізацыя, якая разрывае валентныя сувязі. Электроны, рухаючыся з p_2-базы ў n_1-базу, павялічваюць канцэнтрацыю электронаў у n_1-базе, а дзірак у p_2-базе. Электроны, якія дайшлі да p_1-n_1-пераходу, нейтралізуюць дадатны зарад і зніжаюць патэнцыяльны бар'ер, супраціўленне памяншаецца, асноўны ток павялічваецца. Аналагічна развіваецца працэс і ў p_2-n_2-пераходзе пры канцэнтрацыі дзірак у p_2-базе. Працэс ударнай іанізацыі і павелічэння асноўнага току развіваецца лавінападобна і адпавядае пераключэнню тырыстара ў адкрытае становішча. Прамое напружанне, пры якім адбываецца адкрыванне n_1-p_2-пераходу, называецца

напружаннем уключэння $U_{укл}$, а прамы ток — токам уключэння $I_{укл}$ (кропка *a* — на вольт-ампернай характарыстыцы тырыстара).

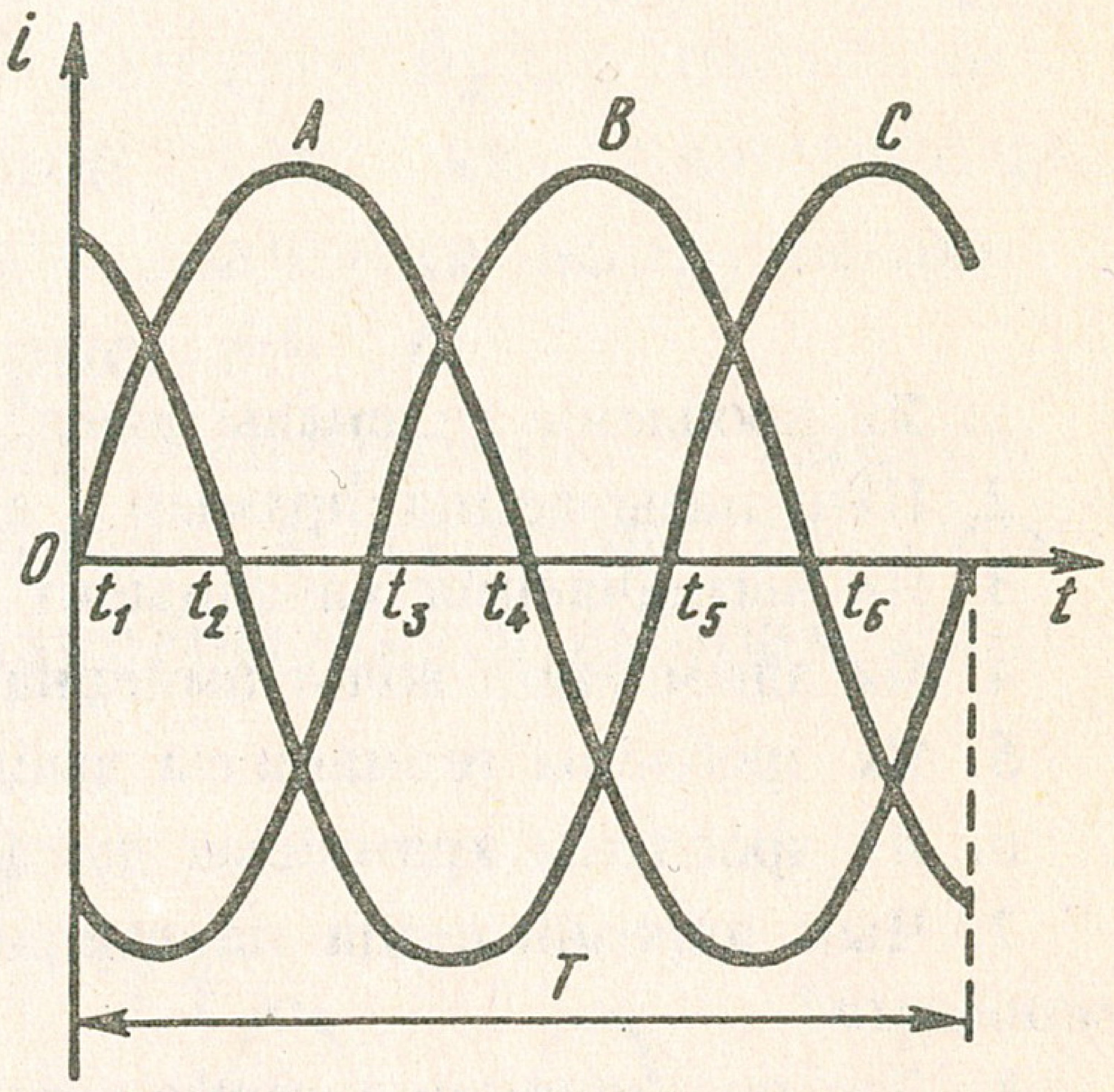
Пераключэнне тырыстараў у адкрытае становішча суправаджаецца хуткім змяншэннем напружання (участак II характарыстыкі). Участак III вольт-ампернай характарыстыкі адпавядае адкрытаму становішчу прыбора. У межах гэтага ўчастка ўсе тры *p*—*n*-пераходы ўключаны ў прамым кірунку, і адносна малое напружанне $U_н$ можа стварыць вялікі ток, які абмяжоўваецца памерамі канструкцыі і спосабам ахалоджвання тырыстара. Пры падачы напружання адваротнай палярнасці пераходы *1* і *3* уключаюцца ў адваротным, а пераход *2* — у прамым напрамку. Пры невялікім адваротным напружанні адбываецца прабой пераходу *1* (пераход *3* мае слабую замыкальную ўласцівасць). На вольт-ампернай характарыстыцы гэта адпавядае ўчастку *IV*, а кропка *b* — прабіўному напружанню. На практыцы пераключэнне тырыстараў з закрытага становішча ў адкрытае выконваецца пастаянным і імпульсным токамі кіруючага электрода, які падключаецца да p_2-базы. У гэтым выпадку ток кіруючага электрода I_k мае кірунак, адпаведны прамому кірунку току p_2-база—катод. Пры гэтым у слоі p_2 павялічваецца канцэнтрацыя дзірак, якія кампенсуюць адмоўны патэнцыял n_1-p_2-перахода, патэнцыяльны бар'ер паніжаецца і n_1-p_2-пераход адкрываецца. Кіруючы ток процілеглай палярнасці закрывае n_1-p_2-пераход.

Пераключэнне тырыстара токам кіруючага электрода мае вялікую перавагу. Па-першае, яно дазваляе токам кіруючага сігнала пераключыць тырыстар пры розных анодных напружаннях $U_н$. Па-другое, дае магчымасць камутаваць вялікія магутнасці слабым кіруючым сігналам (каэфіцыент узмацнення па магутнасці — 10^3-10^4. У імпульсным рэжыме яны могуць камутаваць токі, у 100 разоў большыя за дапушчальны пастаянны ток. Тырыстары сярэдняй магутнасці КУ202 здольныя пераключаць імпульсную магутнасць да 12 кВт пры магутнасці кіруючага сігналу 2,5 Вт. Час пераключэння тырыстара з закрытага становішча ў адкрытае не перавышае некалькі мікрасекунд.

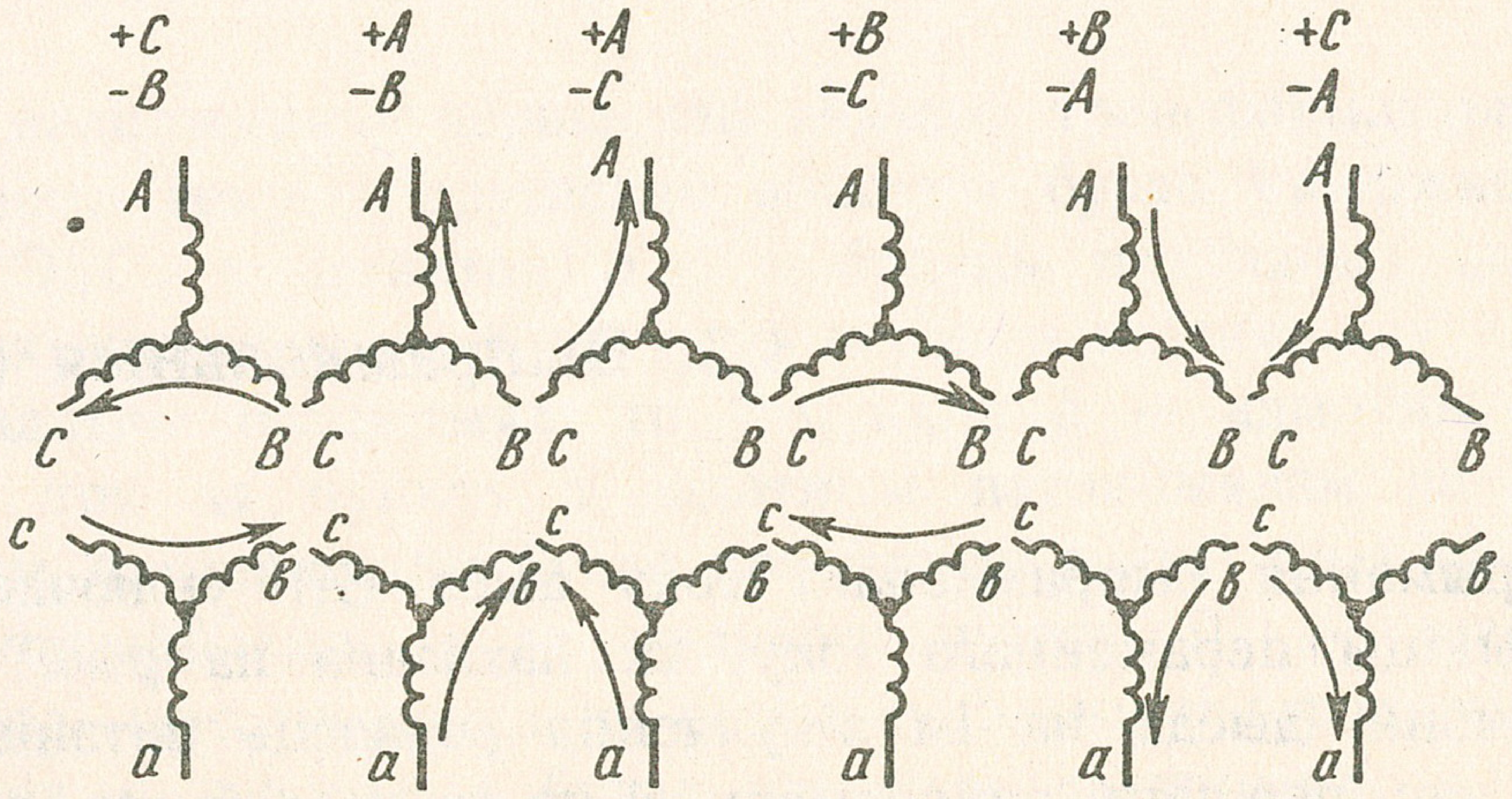
У тэхнічных устройствах, дзе час камутацыі не мае прынцыповага значэння, кіраванне тырыстарам выконваецца кнопкай рэле. У розных імпульсных устройствах пераключэнне выконваецца пры дапамозе пускавых імпульсаў з крутым фронтам. Тырыстары малой магутнасці прымяняюцца ў бескантактных рэлейных схемах, а магутныя, на токі ў некалькі сотняў ампер і напружаннем да тысячы вольт, — у схемах рэгулявання электрапрывадам пастаяннага току і ў якасці пераўтваральніка напружання. Па ДАСТ 10862—64 тырыстарам прысвойваецца абазначэнне, якое склада-

ецца з чатырох элементаў: першы элемент — літара К (або лічба 2), якая паказвае, што выходным матэрыялам з'яўляецца крэмній; другая літара паказвае клас прыбора (Н — дыёдны тырыстар, У — трыёдны тырыстар); трэці элемент — трохзначны лік, які паказвае парадкавы нумар распрацоўкі і электрычную якасць прыбора. Для прыбораў малой магутнасці ўстаноўлены нумары ад 101 да 199, сярэдняй магутнасці — ад 201 да 299 і вялікай магутнасці — ад 301 да 399. Чацвёрты элемент абазначэння — літара, якая паказвае разнавіднасць тыпаў у пэўнай групе тырыстараў. Напрыклад, КН102А — дыёдны тырыстар малой магутнасці, КУ201А—КУ201Е — трыёдныя тырыстары сярэдняй магутнасці.

Інвертар — гэта устройства, якое служыць для пераўтварэння пастаяннага току ў пераменны. Асноўнай часткай інвертараў з'яўляюцца кіруемыя дыёды. На практыцы шырока прымяняюцца інвертары, якія пераўтвараюць пастаянны ток у трохфазны пераменны ток з дапамогай кіруемых тырыстараў. Прынцып работы інвертараў можна прадставіць, калі разглядзець графік трохфазнага току. Звернем увагу на моманты часу t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, калі ў адной з фаз ток роўны нулю (рыс. 5.7), а ў іншых фазах ток мае дадатны або адмоўны кірунак. Напрыклад, у момант часу t_1 у фазе *A* ток роўны нулю, у фазе *C* ток мае дадатны кірунак, а ў фазе *B* — адмоўны кірунак і г. д. Для наступных момантаў часу атрымаем аналагічны малюнак (рыс. 5.8). Кожнаму моманту часу $t_1 - t_6$



Рыс. 5.7. Графік токаў трохфазнай сістэмы



Рыс. 5.8. Схема для паяснення прынцыпу пераўтварэння пастаяннага току ў трохфазны пераменны

адпавядаюць пэўныя кірункі токаў у фазах трохфазнага трансфарматара. Паслядоўнае змяненне кірунку току ў фазах трохфазнага трансфарматара ўзбуджае ў другасных абмотках трансфарматара пераменную ЭРС, зрушаную па фазе на 120°, значыць атрымліваецца трохфазная сістэма пераменнага току.

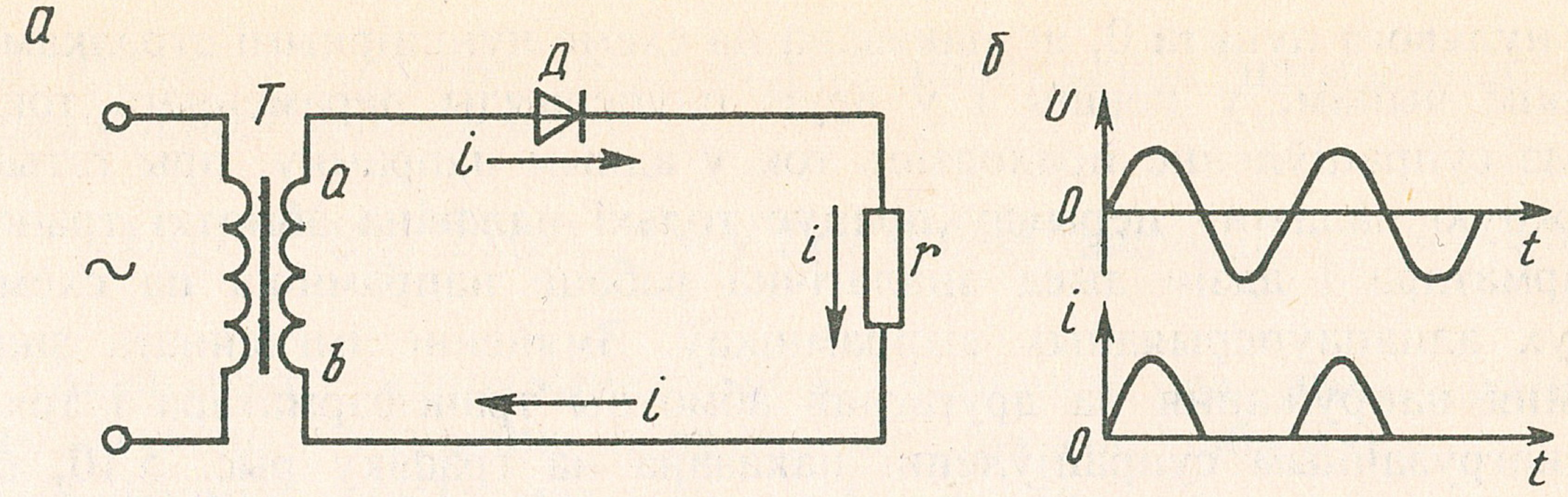
Ролю хуткадзейных ключоў, якія падключаюць кожную фазу трансфарматара ці да плюса крыніцы пастаяннага току ці да мінуса, выконваюць кіруемыя тырыстары. Паслядоўнае пераключэнне кожнай фазы трохфазнага трансфарматара за час перыяду з плюса крыніцы пастаяннага току на мінус не дае сінусоіднага змянення току ў другаснай абмотцы трансфарматара. На практыцы прымяняюцца больш складаныя схемы інвертавання пастаяннага току ў пераменны.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як зроблены селенавы дыёд?
2. Што называецца прамым і адваротным напружаннем дыёда?
3. Як вызначаецца каэфіцыент выпрамлення выпрамніка?
4. Як здымаецца вольт-амперная характарыстыка выпрамніка?
5. Як зроблены германіевы дыёд з кропкавым і плоскасным кантактамі?
6. Як зроблены крэмніевы дыёд?
7. Чым адрозніваецца па выпрамляльных уласцівасцях крэмніевы дыёд ад германіевага?
8. Дзе прымяняюцца германіевыя і крэмніевыя выпрамнікі?
9. Растлумачце ўстройства і прынцып работы паўправадніковага тырыстара.
10. Як выконваецца пераключэнне тырыстара напружаннем і токам кіравання?
11. Як здымаецца вольт-амперная характарыстыка трыёднага тырыстара?
12. Для чаго прымяняюцца тырыстары?
13. Што называецца інвертарам?
14. Растлумачце ўстройства і прынцып работы інвертара, які пераўтварае пастаянны ток у трохфазны пераменны ток.
15. Якая роля кіруемых тырыстараў у інвертары?

5.2. Выпрамляльныя схемы

Для атрымання выпрамленага току дыёд (*Д*) уключаецца ў ланцуг крыніцы пераменнага току, як паказана на рыс. 5.9, *а*. Пры ўключэнні дыёда на ім з'яўляецца рознасць патэнцыялаў. Няхай за час першага паўперыяду ў пункце *a* будзе дадатны патэнцыял, у пункце *b* — адмоўны (рыс. 5.9). За час гэтага

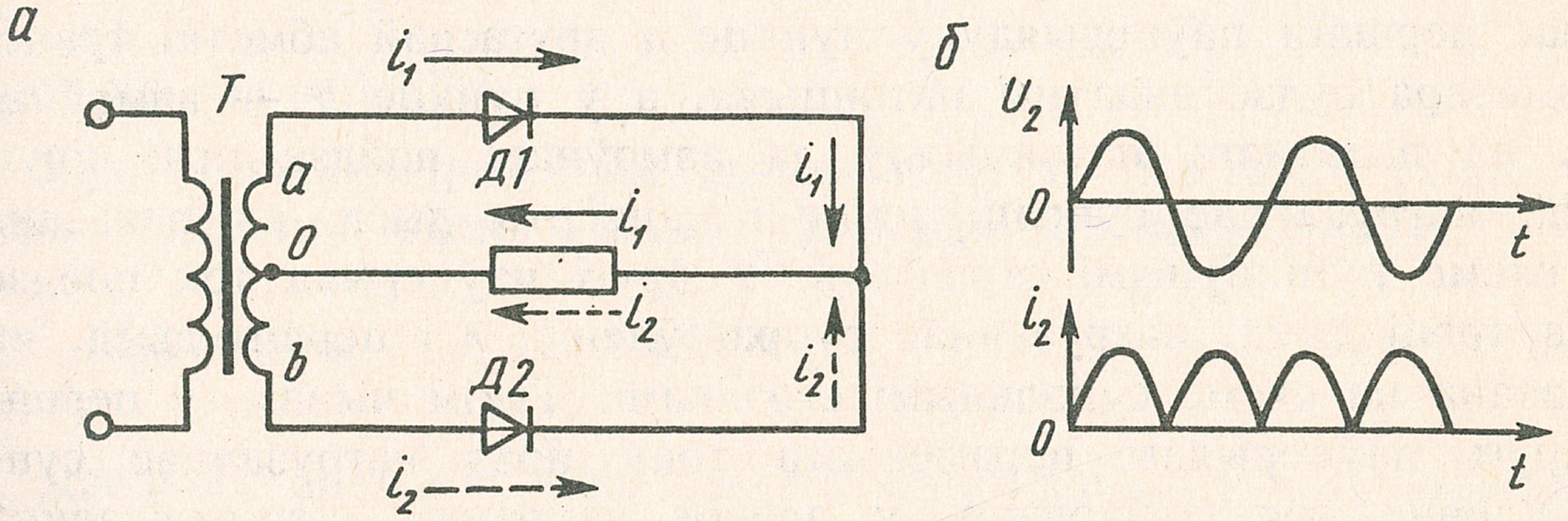


Рыс. 5.9. Аднапаўперыяднае выпрамленне:

а — схема ланцуга; *б* — графік

паўперыяду ў ланцугу будзе прамы ток, а за час другога паўперыяду — адваротны. Паколькі адваротны ток вельмі малы, то яго ў разлік можна не прымаць. У ланцугу будзе пастаянны па напрамку і пераменны па значэнні ток, які называецца пульсуючым токам. Змяненне імгненнага значэння напружання і току ў ланцугу паказана на графіку рыс. 5.9, *б*.

Для атрымання двухпаўперыяднага выпрамніка выкарыстоўваецца маставая або двухпаўперыядная з нулявым пунктам схема. Схема з нулявым пунктам двухпаўперыяднага выпрамлення паказана на рыс. 5.10, *а*.

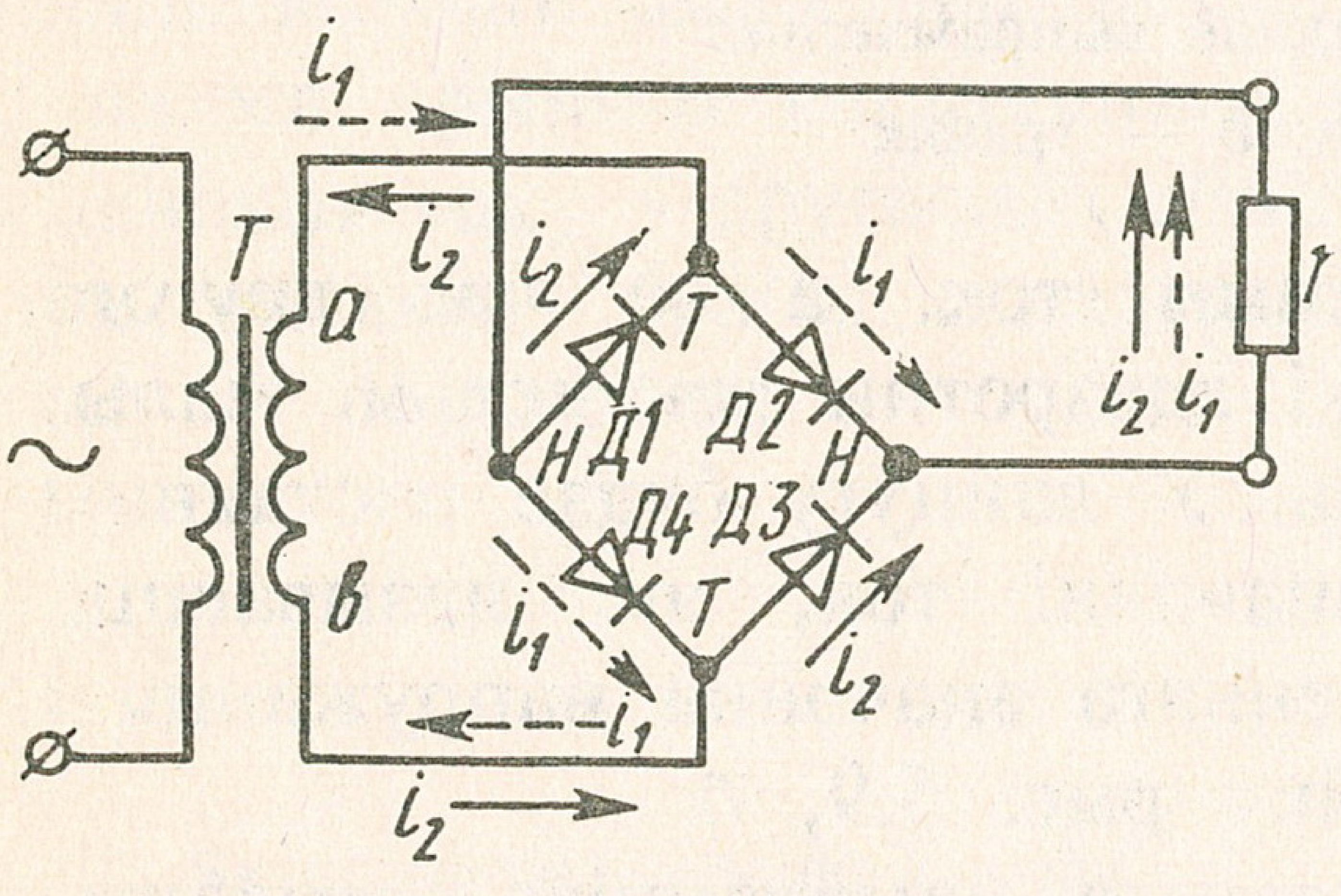


Рыс. 5.10. Двухпаўперыяднае выпрамленне:

а — схема ланцуга з нулявым пунктам; *б* — графік

Пры падключэнні першаснай абмоткі трансфарматара ў сетку пераменнага току ў другаснай абмотцы будзе ўзбуджацца пераменная ЭРС, у пунктах *a* і *b* будуць паяўляцца дадатныя і адмоўныя патэнцыялы. Калі ў час першага паўперыяду ў пункце *a* будзе дадатны патэнцыял, то ў пункце *b* — адмоўны. У гэтым выпадку ток ад пункту з дадатным патэнцыялам да пункту з адмоўным патэнцыялам будзе праходзіць толькі праз першы дыёд *Д1* і супраціўленне *r* да нулявога пункта 0, які мае нулявы патэнцыял, што паказана на схеме суцэльнымі стрэлкамі. У другі паўперыяд у пункце *a* будзе адмоўны патэнцыял, а ў пункце *b* — дадатны. Тады ток пойдзе праз другі дыёд *Д2* і супраціўленне

да нулявога пункта 0, як паказана на схеме пункцірнымі стрэлкамі. Такім чынам, у першы і ў другі паўперыяды пераменнага току праз супраціўленне праходзіць ток у адным напрамку, пры гэтым кожную палавіну перыяду працуе толькі палавіна абмоткі трансфарматара і адзін дыёд аналагічна рабоце напрамніка па схеме двух аднапаўперыядных выпрамнікаў. Змяненне імгненнага значэння напружання на другаснай абмотцы трансфарматара і току ў нагрузачным супраціўленні паказана на графіку рыс. 5.10, *б*.



Рыс. 5.11. Маставая схема двухпаўперыяднага выпрамлення

Маставая схема двухпаўперыяднага выпрамлення паказана на рыс. 5.11. У гэтай схеме дыёды *1* і *2*, *3* і *4* злучаны паслядоўна, а галіны паміж сабою — паралельна. Нагрузачнае супраціўленне падключаецца да кантактаў *НН*, а другасная абмотка трансфарматара да кантактаў *ТТ*. Пры ўключэнні першаснай абмоткі трансфарматара ў сетку пераменнага току ў другаснай абмотцы будзе ўзбуджацца пераменная ЭРС. Няхай у час першага паўперыяду ў пункце *a* другаснай абмоткі трансфарматара будзе дадатны патэнцыял, а ў пункце *b* — адмоўны. Ток ад дадатнага патэнцыялу да адмоўнага пойдзе праз другі дыёд, нагрузачнае супраціўленне і чацвёрты дыёд, як паказана на схеме пункцірнымі стрэлкамі. У другі паўперыяд ток пойдзе праз трэці дыёд, нагрузачнае супраціўленне *r* і першы дыёд, як паказана на схеме суцэльнымі стрэлкамі. Такім чынам, у першы і другі паўперыяды пераменнага току праз нагрузачнае супраціўленне ток праходзіць у адным напрамку, атрымліваецца пульсуючы ток.

Для вымярэння выпрамленых напружанняў і токаў прымяняюцца магнітаэлектрычныя прыборы, якія паказваюць сярэднія значэнні пульсуючага току і напружання. У выпадку аднапаўперыяднага выпрамлення сярэдняе значэнне выпрамленага напружання з нагрузкай

$$U_0 = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} U_m \sin \omega\, t dt = -\frac{U_m}{T\omega}\cos \omega t \Big|_0^{T/2} = \frac{U_m}{\pi}. \qquad (5.1)$$

Электрамагнітны вальтметр, падключаны да другаснай абмоткі трансфарматара, пакажа дзейнае значэнне напружання $U = U_m/\sqrt{2}$. Стасунак сярэдняга значэння выпрамленага напружання

да дзейнага значэння пераменнага напружання называецца *каэфіцыентам выпрамлення:*

$$U_0/U = U_m\sqrt{2}/(\pi U_m) = \sqrt{2}/\pi = 0{,}45, \text{ значыць, } U_0 = 0{,}45U.$$

Адваротнае напружанне, якое дзейнічае на дыёд, роўнае амплітуднаму значэнню напружання другаснай абмоткі.

З формулы (5.1) маем $U_{адв} = U_m = \pi\, U_0$.

Магнітаэлектрычны амперметр, уключаны ў ланцуг з дыёдам, пакажа сярэдняе значэнне выпрамленага (пульсуючага) току $I_0 = I_m/\pi$, а электрамагнітны амперметр — дзейнае значэнне выпрамленага (пульсуючага) току:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T/2} i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2\omega t dt} = \frac{I_m}{2}.$$

Стасунак сярэдняга значэння выпрамленага току да дзейнага яго значэння

$$I_0/I = 2I_m/(\pi I_m) = 2/\pi = 0{,}636 .$$

Значыць, $I_0 = 0{,}636I$.

Пры двухпаўперыядным выпрамленні па маставой схеме сярэднія значэнні выпрамленых напружання і току роўныя:

$$U_0 = 2U_m/\pi \quad і \quad I_0 = 2I_m/\pi . \qquad (5.2)$$

Дзейныя значэнні пераменнага напружання і току пры выпрамленні па маставой схеме роўныя: $U = U_m/\sqrt{2}$, $I = I_m/\sqrt{2}$, а стасунак сярэдніх значэнняў напружання і току да дзейных значэнняў

$$U_0/U = 2U_m\sqrt{2}/(\pi U_m) = 0{,}9 ; \quad I_0/I = 2I_m\sqrt{2}/(\pi I_m) = 0{,}9 .$$

Значыць, $U_0 = 0{,}9U$ і $I_0 = 0{,}9I$.

Адваротнае напружанне, якое дзейнічае на кожны дыёд, роўнае амплітуднаму значэнню напружання другаснай абмоткі. З формулы (5.2) маем $U_{адв} = U_m = (\pi/2)U_0$. Для двухпаўперыяднага выпрамлення па схеме з нулявым пунктам сярэднія значэнні выпрамленых напружання і току роўныя падвоеным значэнням выпрамленых напружання і току пры аднапаўперыядным выпрамленні:

$$U_0 = 2U_m/\pi \quad і \quad I_0 = 2I_m/\pi , \qquad (5.3)$$

дзе U_m — амплітуда пульсацыі напружання — амплітуда напружання палавіны другаснай абмоткі; I_m — амплітуда пульсацыі току.

Дзейнае значэнне пульсуючага напружання $U = U_m/\sqrt{2}$, а стасунак сярэдняга значэння пульсуючага напружання да дзейнага

$$U_0/U = 2U_m\sqrt{2}/(\pi U_m) = 0{,}9\text{ , значыць, } U_0 = 0{,}9U\text{ .}$$

Адваротнае напружанне, якое дзейнічае на кожны дыёд, роўнае суме амплітуд напружанняў абедзвюх палавін другаснай абмоткі трансфарматара. З формулы (5.3) маем

$$U_{адв} = 2U_m = \pi\, U_0\text{ .}$$

Дзейнае значэнне пульсуючага току ў другаснай абмотцы трансфарматара роўнае дзейнаму значэнню току аднапаўперыяднага выпрамлення: $I = I_m/2$. Стасунак сярэдняга значэння выпрамленага току да дзейнага значэння $I_0/I = 2I_m2/(\pi I_m)$, значыць, $I_0 = (4/\pi)I = 1{,}27I$. Сярэдняе значэнне выпрамленага току, які праходзіць праз адзін дыёд, $I_д = I_0/2 = 2/\pi\, I = 0{,}636I$.

Напружанне на нагрузцы, якая падключана да выпрамніка, з'яўляецца пульсуючым. Раскладзем выраз для імпульсаў напружання пры двухпаўперыядным выпрамленні ў рад Фур'е, атрымаем:

$$U_н = 0{,}636\, U_{mн} - 0{,}425U_{mн}\sin(2\omega t + \alpha_1) + 0{,}085U_{mн}\cos(4\omega t + \\ + \alpha_2) - \ldots$$

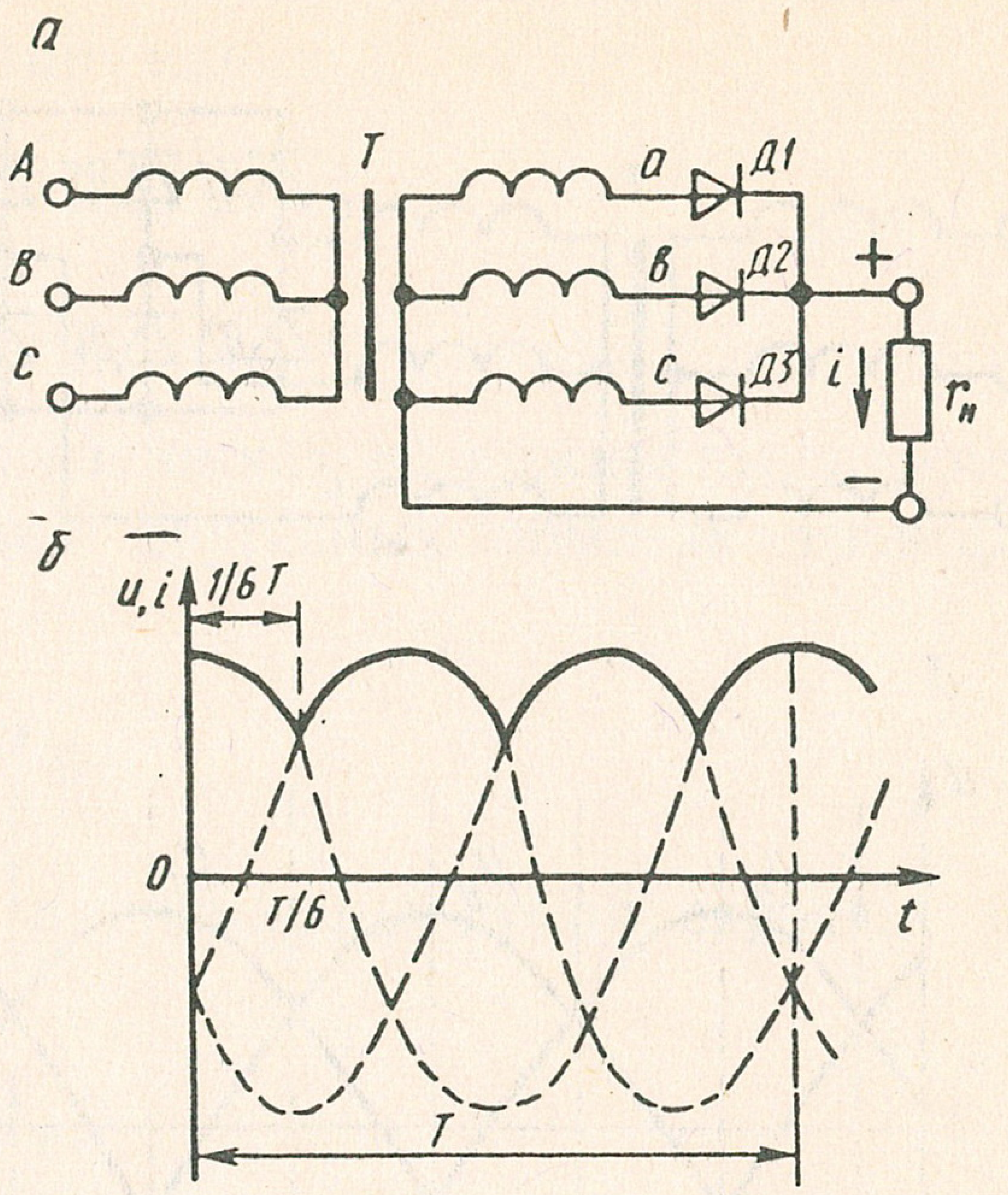
Першы член рада з'яўляецца пастаянным састаўным ($0{,}636U_{mн} = U_{0н}$), другі член $0{,}425U_{mн}\sin(2\omega t + \alpha)$ — першая гармоніка. Астатнія члены рада маюць больш высокія частоты і хуткапамяншальныя амплітуды, і ў разлік іх прымаць не будзем.

Пульсацыя напружання вызначаецца каэфіцыентам пульсацыі $K_п$. Каэфіцыент пульсацыі вызначаецца стасункам амплітуды першай гармонікі напружання на нагрузцы U_{m1} да сярэдняга значэння напружання на нагрузцы. Для двухпаўперыяднага выпрамлення будзем мець

$$K_п = U_{m1}/U_{0н} = 0{,}425U_{mн}/0{,}636U_{mн} = 0{,}67.$$

На практыцы шырока прымяняюцца выпрамнікі трохфазнага пераменнага току. Разгледзім дзве схемы выпрамлення трохфазнага току: з вывадам нулявога пункта (аднатактную) і маставую (двухтактную). У трохфазнай аднатактнай схеме выпрамлення (рыс. 5.12, *а*) другасныя абмоткі трансфарматара злучаюцца зоркай з вывадам на клему нулявога пункта. Трохфазны выпрамнік,

сабраны па аднатактнай схеме, можна прадставіць як спалучэнне трох аднафазных схем выпрамлення. У кожны момант часу ток праз нагрузку вызначаецца толькі адной фазай другаснай абмоткі трансфарматара, якая мае найбольшы дадатны патэнцыял. За перыяд кожная фаза другаснай абмоткі трансфарматара стварае адзін імпульс току праз нагрузку. Графік напружання на нагрузцы ($r_н$) паказаны на рыс. 5.12, *б* суцэльнай лініяй. Аналагічны выгляд мае і графік току праз нагрузку.



Рыс. 5.12. Схема трохфазнага выпрамлення з нулявым вывадам

Для вызначэння сярэдняга значэння выпрамленага напружання выдзелім на графіку участак, які па часе роўны $(1/6)T$, і вылічым для яго сярэдняе значэнне напружання:

$$U_0 = \frac{6}{T}\int_0^{T/6} U_m \cos \omega\, t dt = \frac{6U_m}{T\omega} \sin \omega t \Big|_0^{T/6} = \frac{3\sqrt{3}U_m}{2\pi} = 0{,}826U_m .$$

Стасунак выпрамленага напружання да дзейнага значэння фазнага пераменнага напружання

$$U_0/U = 3\sqrt{3}U_m\sqrt{2}/(2\pi U_m) = 1{,}17 ,$$

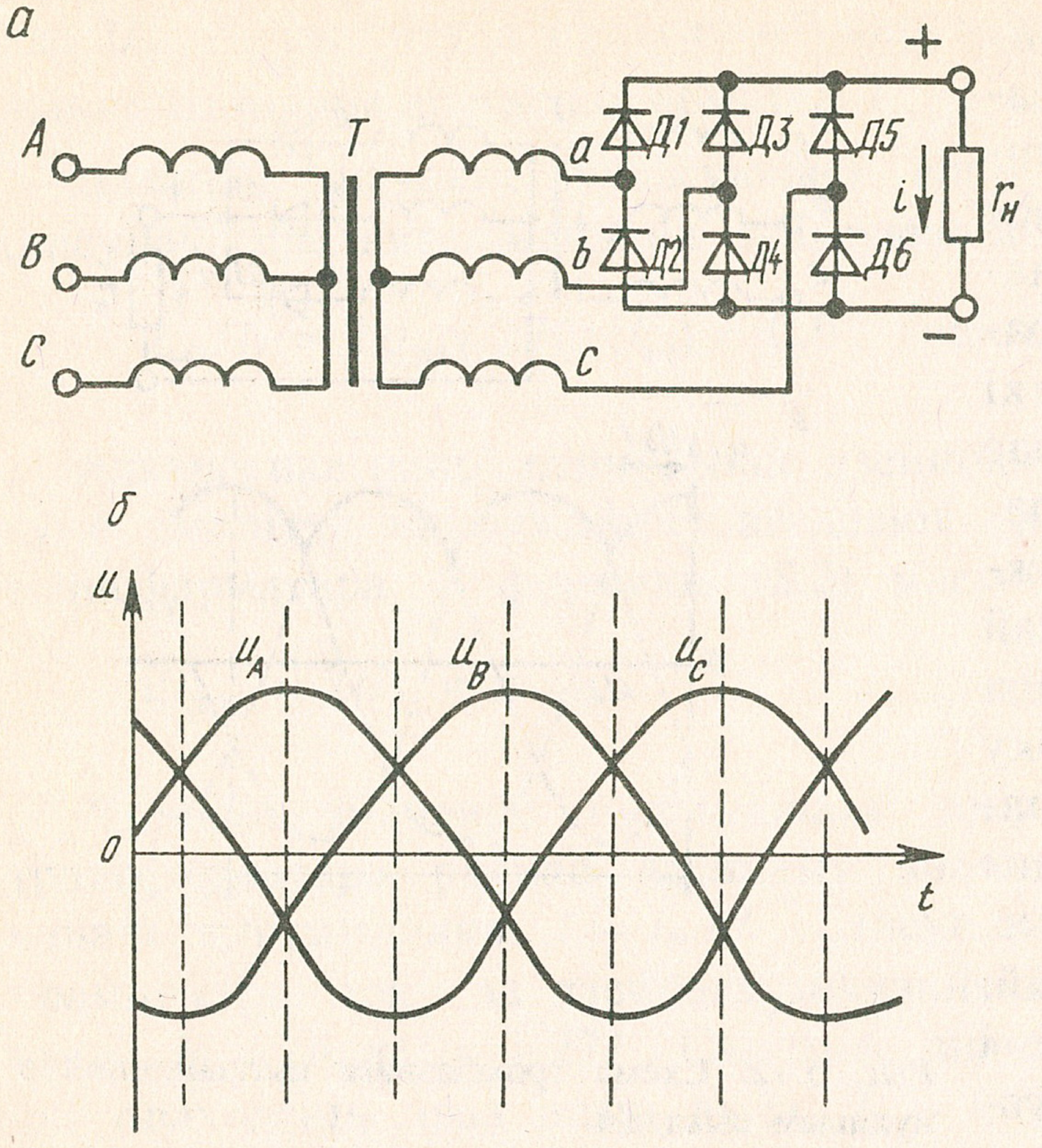
значыць, $U_0 = 1{,}17U$.

Адваротнае напружанне, якое дзейнічае на кожны дыёд, роўнае амплітудзе лінейнага напружання другаснай абмоткі трансфарматара:

$$U_{адв} = U_{mл} = \sqrt{2}U_л = \sqrt{2}\sqrt{3}\,U_ф = \sqrt{2}\,\frac{\sqrt{3}}{1{,}17}\,U_0 = 2{,}09U_0 .$$

Сярэдняе значэнне выпрамленага току ў нагрузцы вызначаецца сумай сярэдніх значэнняў токаў праз дыёды, значыць,

$$I_0 = 3I_л = 0{,}826I_m .$$



Рыс. 5.13. Маставая схема трохфазнага выпрамлення

Маставая схема выпрамлення трохфазнага пераменнага току паказана на рыс. 5.13,*а*. У маставой схеме першасныя і другасныя абмоткі трансфарматара могуць злучацца як зоркай, так і трохвугольнікам. На схеме рыс. 5.13, *а* першасныя і другасныя абмоткі злучаны зоркай, а нагрузка падключана пад лінейнае напружанне. Катоды трох дыёдаў *Д1, Д3* і *Д5* злучаюцца разам і ствараюць дадатны патэнцыял на нагрузцы, а аноды трох дыёдаў *Д2, Д4* і *Д6* ствараюць вывад з адмоўным патэнцыялам на нагрузцы. За перыяд змянення напружання на абмотках трансфарматара адбываецца шэсць пульсацый току праз супраціўленне нагрузкі: тры пульсацыі току пры паслядоўным стварэнні максімальных дадатных патэнцыялаў на цотных дыёдах і тры пульсацыі току пры стварэнні найбольшых адмоўных патэнцыялаў на няцотных (рыс. 5.13, *б*). Пераключэнне дыёдаў робіцца ў моманты, калі перасякаюцца сінусоіды. Працягласць пульсацый току на нагрузцы роўная $T/6$. Для вызначэння сярэдняга значэння выпрамленага напружання U_0 праінтэгруем імгненныя значэнні напружання на супраціўленні нагрузкі $u = U_{mл}\cos\omega t$ у межах ад $-T/12$ да $+T/12$ і вылічым сярэдняе значэнне:

$$U_0 = \frac{6}{T}\int_{-T/12}^{+T/12} U_{mл}\cos\omega t dt = \frac{3\,U_{mл}}{\pi}\sin\omega t\Bigg|_{-T/12}^{+T/12} = \frac{3}{\pi}U_{mл},$$

дзе $U_{mл}$ — амплітуда лінейнага напружання другаснай абмоткі трансфарматара.

Стасунак сярэдняга значэння выпрамленага напружання да дзейнага значэння лінейнага напружання

$$U_0/U_л = 3U_{mл}\sqrt{2}/(\pi U_{mл}) = 1,35 ,$$

значыць, $U_0 = 1,35U_л = 2,34U_ф$.

Адваротнае напружанне, якое дзейнічае на кожны дыёд, роўнае амплітудзе лінейнага напружання другасных абмотак трансфарматара,

$$U_{адв} = U_{mл} = \sqrt{2}U_л = 1,05U_0 .$$

Выпрамлены ток у нагрузцы вызначаецца сумай сярэдніх значэнняў токаў праз дыёды:

$$I_0 = 3I_л = (3/\pi)\, I_{mл} = 1,35I_л ,$$

дзе $I_л$ — дзейнае значэнне току ў другаснай абмотцы трансфарматара.

Трохфазныя выпрамнікі, сабраныя на маставой схеме, прымяняюцца на практыцы для выпрамлення пераменнага току вялікай магутнасці.

Для згладжвання пульсацый выпрамленага напружання прымяняюцца фільтры. У якасці фільтра можа служыць кандэнсатар, падключаны паралельна нагрузцы. Пульсуючы ток мае пастаянную і пераменную састаўляльныя. Кандэнсатар мае малое супраціўленне пераменным састаўляльным току. Пераменныя састаўляльныя пульсуючага току замыкаюцца праз кандэнсатар, а пастаянная састаўляльная зараджае кандэнсатар да пэўнага напружання. Пры змяншэнні напружання імпульсу напружанне кандэнсатара не дапускае змяншэння напружання на нагрузцы, што і стварае згладжванне пульсацыі напружання на нагрузцы. Кандэнсатар разраджаецца на супраціўленне нагрузкі.

Зробім разлік ёмістаснага фільтра. Працягласць імпульсу напружання на выхадзе выпрамніка роўная T/m (T — перыяд току ў сетцы, m — лік пульсацый за перыяд T). Кандэнсатар, падключаны да выпрамніка, зараджаецца за час τ, а разраджаецца на супраціўленне нагрузкі за час $T/m - \tau$. Паколькі $\tau << T/m$, то можна лічыць, што разрад адбываецца за час T/m.

Разрад кандэнсатара адбываецца да пэўнага напружання U_2. Значыць, сярэдняе значэнне напружання на кандэнсатары можна лічыць роўным $U_{0н} = (U_1 + U_2)/2$, а амплітуда яго змянення $U_m = U_1 - U_{0н}$. Прымаючы пад увагу, што $U_m << U_{0н}$, можна

запісаць, што разрадны ток $I_н = U_{0н}/r_н$ ($r_н$ — супраціўленне нагрузкі).

Змяненне напружання на кандэнсатары на $2U_m$ прывядзе да змянення зараду на яго абкладках $\Delta q_c = 2CU_m \approx U_{0н}/r_н \cdot T/m$. Адсюль каэфіцыент пульсацыі выпрамленага напружання

$$K_п = U_m/U_{0н} = 1/(2Cmfr_н)\ .$$

Калі вядомы каэфіцыент пульсацыі, які выбіраецца ў межах 5—15 %, і другія велічыні ($m, f, r_н$), можна вызначыць ёмістасць кандэнсатара. Ёмістасны фільтр прымяняецца для згладжвання пульсацый напружання пры малых токах нагрузкі (20—30 мА).

Дросель, які падключаны паслядоўна нагрузачнаму супраціўленню, таксама згладжвае пульсацыі напружання. Дросель мае вялікае супраціўленне пераменнай састаўляльнай току і не прапускае яе на нагрузку. У момант максімальнага значэння току ў ланцугу ў дроселі энергія магнітнага поля таксама дасягне максімальнага значэння. Пры змяншэнні току ў ланцугу змяншыцца і магнітнае поле дроселя, а гэта прывядзе да ўзбуджэння ЭРС самаіндукцыі, якая згладжвае пульсацыі.

Каэфіцыент пульсацыі напружання на ўваходзе фільтра $K_{п1} = U_m/U_0$, а на выхадзе (на нагрузцы) $K_{п2} = U_{mн}/U_{0н}$. Паколькі $U_0/U_{0н}=(r_н+r_{др})/r_н$, а $U_m/U_{mн} = \sqrt{(r_н+r_{др})^2+(\omega Lm)^2/r_н}$, то каэфіцыент фільтрацыі (згладжвання пульсацый) індуктыўнага фільтра

$$K_ф = K_{п1}/K_{п2} = U_m/U_0 : U_{mн}/U_{0н} = U_m/U_{mн} : U_0/U_{0н} =$$

$$= \sqrt{(r_н + r_{др})^2 + (\omega L_m)^2}/(r_н + r_{др})\ . \tag{5.4}$$

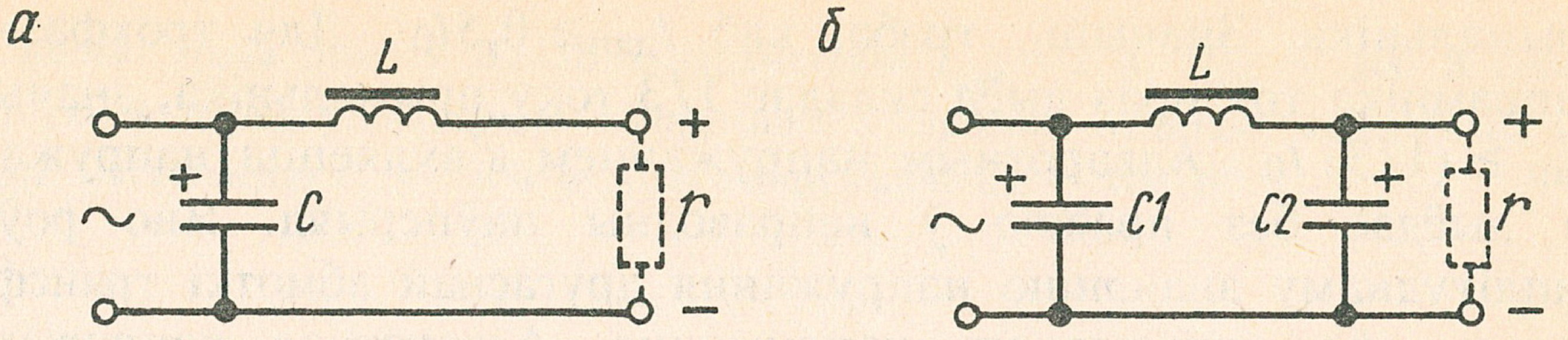
Прымаючы пад увагу, што $r_{др} << r_н$, а $r_н << \omega Lm$, атрымаем спрошчаную формулу каэфіцыента фільтрацыі:

$$K_ф = \omega Lm/r_н\ .$$

Лепшае згладжванне пульсацый выпрамленага напружання атрымліваецца пры падключэнні кандэнсатараў і дроселя ў Г- і П-падобныя LC-фільтры (рыс. 5.14).

Каэфіцыент фільтрацыі Г-падобнага LC-фільтра вызначаецца па формуле

$$K_ф = m^2\omega^2 LC\ ,$$



Рыс. 5.14. Схема фільтраў:
а — Г-падобны; *б* — П-падобны

дзе m — лік фаз выпрамлення; $\omega = 2\pi f_c$ (f_c — частата сеткі); L — індуктыўнасць дроселя; C — ёмістасць кандэнсатара.

Адвольна выбіраць значэнні ёмістасці кандэнсатара і індуктыўнасці дроселя нельга. Калі ўласная частата фільтра (ω_0) і частата пульсацыі акажуцца аднолькавымі, фільтр будзе не аслабляць, а ўзмацняць пульсацыі напружання. Каб пазбавіцца такіх рэзанансных з'яў у фільтры, неабходна, каб $2\omega_0 << m\omega_c$ (ω_c — частата сеткі).

Дросель мае малое актыўнае супраціўленне і нязначнае падзенне напружання на ім ($\Delta U_{др} = I_0 r_{др}$). Гэта дае магчымасць прымяняць такія фільтры для параўнальна вялікіх токаў нагрузкі.

Недахопам LC-фільтраў з'яўляецца вялікая маса дроселя і ўзнікненне пры рабоце магнітнага поля, якое стварае перашкоды ў рабоце высокаадчувальных прыёмных устройстваў. Гэтых недахопаў пазбаўлены Г-падобныя rC-фільтры. Каэфіцыент фільтрацыі такога фільтра вызначаецца па формуле $K_ф = \omega_c m r C$. Пры гэтым $r \leq 0{,}1 r_н$ ($r_н$ — актыўнае супраціўленне нагрузкі). Недахопам rC-фільтраў з'яўляецца некаторае падзенне пастаяннай састаўляльнай напружання ($\Delta U_ф = r I_0$). Гэтым абумоўліваецца прымяненне rC-фільтраў для малых токаў нагрузкі.

Пры выбары выпрамляльнай схемы і мантажу выпрамніка звычайна задаюцца значэнні магутнасці прымальніка P_0, якія сілкуецца ад выпрамніка, і выпрамленага напружання, якое адпавядае напружанню прымальніка U_0. Па гэтых даных вызначаецца ток прымальніка: $I_0 = P_0/U_0$. Па току прымальніка выбіраюцца неабходныя паўправадніковыя дыёды для мантажу выпрамніка і яго схемы. Асноўнымі параметрамі паўправадніковых дыёдаў з'яўляюцца адваротнае напружанне $U_{адв}$, якое вытрымлівае дыёд без прабою ў неправодны паўперыяд, і дапушчальны ток $I_{дап}$, на які разлічаны дыёд. Пры складанні схемы выпрамніка трэба мець на ўвазе, што для сінусаідальнага выпрамніка дапушчальны ток праз дыёд роўны току ў прымальніку, пры гэтым трэба, каб $I_{дап} \geq I_0$. У двухпаўперыядным выпрамніку з сярэднім пунктам і па маставой схеме ток праз дыёд роўны палавіне току

прымальніка. Значыць, трэба, каб $I_{\text{дап}} \geq 0{,}5 I_0$. Для трохфазнага выпрамніка ток праз дыёд складае 1/3 току прымальніка, значыць, $I_{\text{дап}} \geq (1/3)\, I_0$. Адваротным напружаннем з'яўляецца напружанне на дыёдзе без прабою ў неправодны паўперыяд. Яно роўнае амплітуднаму значэнню напружання другаснай абмоткі трансфарматара або пульсуючага напружання. Адваротнае напружанне, якое дзейнічае на дыёд, залежыць ад схемы выпрамніка. Так, для аднапаўперыяднага выпрамніка і двухпаўперыяднага з сярэднім пунктам $U_{\text{адв}} = U_m = \pi U_0 \approx 3{,}14 U_0$. Для маставой схемы выпрамніка адваротнае напружанне $U_{\text{адв}} = U_m = \pi/2 U_0 \approx 1{,}57 U_0$. Для трохфазнага выпрамніка адваротнае напружанне $U_{\text{адв}} = U_{m\text{л}} \approx 2{,}09 U_0$. Пры выбары дыёда павінны выконвацца ўмовы $U_{\text{адв}} \geq U_{\text{д}}$, дзе $U_{\text{д}}$ — адваротнае напружанне дыёда.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Ці аднолькавы ток пакажуць магнітаэлектрычны і электрамагнітны амперметры, уключаныя ў ланцуг аднапаўперыяднага выпрамніка?

2. Чаму роўны стасунак сярэдняга значэння напружання і выпрамленага току да дзейнага значэння напружання і току ў другаснай абмотцы трансфарматара пры аднапаўперыядным выпрамленні?

3. Чаму роўны стасунак сярэдняга значэння выпрамленага току і напружання да дзейнага значэння пераменнага току і напружання другаснай абмоткі трансфарматара ў выпрамніку, сабраным па схеме з нулявым пунктам?

4. Чаму роўны стасунак сярэдняга значэння выпрамленага напружання да дзейнага значэння фазнага напружання другаснай абмоткі трансфарматара ў выпрамніку трохфазнага току, сабраным па схеме з вывадам нулявога пункта? Сабраным па маставой схеме?

5. Што здарыцца, калі клемы нагрузкі *НН* у маставой схеме падключыць да сеткі пераменнага току, а да клем *ТТ* падключыць нагрузку?

6. Колькі элементаў селенавага дыёда трэба ўзяць для складання маставой схемы пры напружанні сеткі $U = 220$ В?

Адказ: 24 элементы.

7. Як вызначыць каэфіцыент пульсацыі ў ёмістасным фільтры?

8. Як вызначыць каэфіцыент фільтрацыі пры дросельным фільтры?

9. Па якой формуле вызначаецца ёмістасць кандэнсатара ў Г-падобным індуктыўна-ёмістасным фільтры?

10. Па якіх параметрах падбіраюцца дыёды для мантажу выпрамніка пераменнага току?

11. Якім умовам павінен задавальняць дыёд для мантажу аднапаўперыяднага, двухпаўперыяднага выпрамніка, сабранага па маставой схеме і па схеме з сярэднім пунктам?

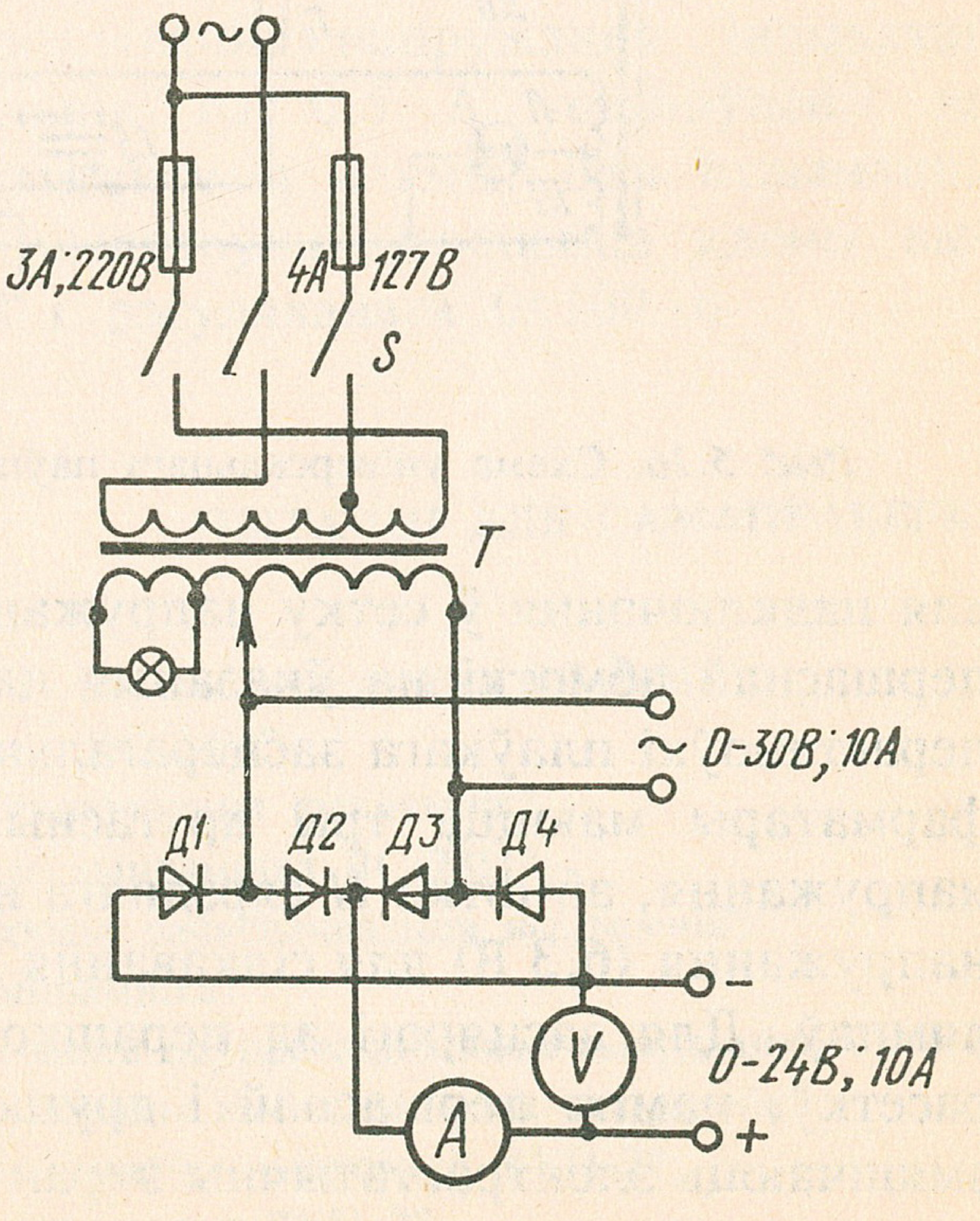
12. Як скласці схему аднапаўперыяднага выпрамніка для сілкавання пастаянным токам прымальніка магутнасцю $P_0 = 400$ Вт пры напружанні $U_0 = 25$ В, калі выкарыстаць дыёды Д242Б з параметрамі $I_{\text{дап}} = 10$ А, $U_{\text{адв}} = 100$ В?

13. Колькі трэба дыёдаў Д243Б з параметрамі $I_{\text{дап}} = 2$ А, $U_{\text{адв}} = 200$ В і як скласці схему двухпаўперыяднага выпрамніка з сярэднім пунктам, каб сілкаваць прыёмнік магутнасцю $P_0 = 300$ Вт пры напружанні $U_0 = 100$ В?

5.3. Школьныя выпрамнікі тыпаў ВС і ВУП

У школьнай практыцы для правядзення вопытаў і лабараторных заняткаў, а таксама зарадкі акумулятараў шырока выкарыстоўваюцца селенавыя і германіевыя выпрамнікі пераменнага току. Селенавыя выпрамнікі (ВС) маюць рад мадыфікацый: ВС-6; ВС4-12; ВС-24М і інш. Усе яны складаюцца з паніжальнага трансфарматара і селенавых дыёдаў, сабраных па маставой схеме або па схеме з сярэднім пунктам.

Схема выпрамніка ВС-24М паказана на рыс. 5.15. Трансфарматар у выпрамніку тараідальны з дзвюма асобнымі абмоткамі. У канструкцыі трансфарматара прадугледжана ўключэнне першаснай абмоткі ў сетку напружаннем 127 і 220 В частатой 50 Гц. Максімальна дапушчальны ток другаснай абмоткі — 10 А, а першаснай пры напружанні сеткі 127 В – 4 А, пры напружанні сеткі 220 В — 3 А. Выпрамнік сабраны па маставой схеме з 12 селенавых элементаў квадратнай формы ў выглядзе выпрамляльнага слупка. Пры плаўным павелічэнні пераменнага напружання ад 0 да 30 В на выхадзе выпрамніка будзе выпрамленае напружанне ад 0 да 24 В пры максімальнай сіле току 10 А. У выпрамніку прадугледжана бесперапыннае здыманне з другаснай абмоткі трансфарматара пераменнага напружання ад 0 да 30 В. Выпрамнік забяспечаны магнітаэлектрычным амперметрам на 10 А і магнітаэлектрычным вальтметрам на 50 В і двума

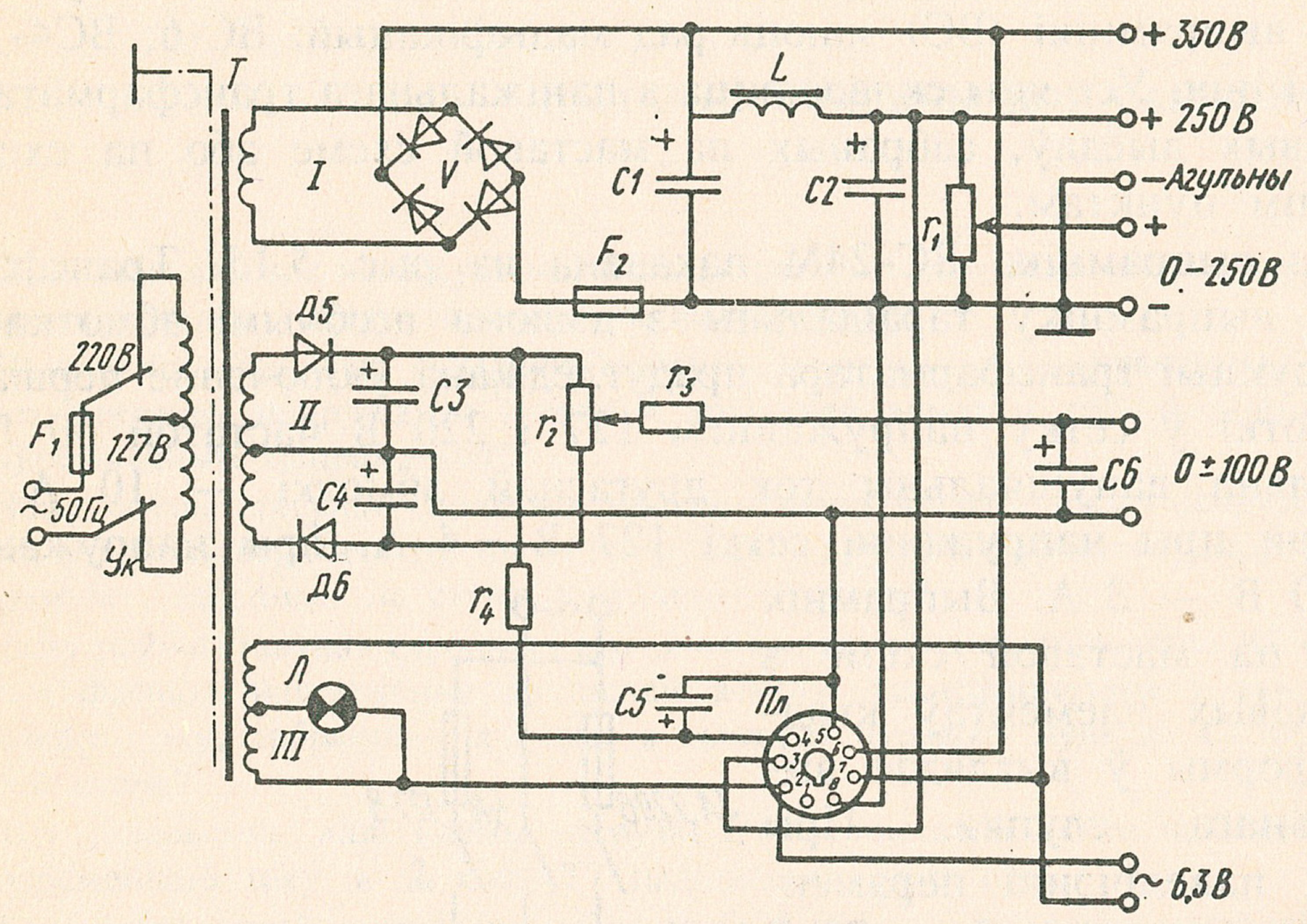


Рыс. 5.15. Схема выпрамніка ВС-24М

засцерагальнікамі на 4 і 3 А. Пры поўнай нагрузцы (напружанні 24 В і току 10 А) магутнасць выпрамніка роўная 450 Вт.

На пярэдняй сценцы выпрамніка маюцца: ручка плаўнага рэгулявання выхаднога напружання, выключальнік, амперметр, вальтметр, клемы +, − і ~ , сігнальная лямпачка.

Для сілкавання радыётэхнічных дэманстрацыйных установак і прыбораў, якімі карыстаюцца пры вывучэнні фізікі, прымяняюцца выпрамнікі універсальныя паўправадніковыя (ВУП). Схема універсальнага паўправадніковага выпрамніка ВУП-2 паказана на рыс. 5.16. Універсальны выпрамнік складаецца з сілавога трансфарматара магутнасцю 150 Вт на першаснай абмотцы, двухпаўперыяднага і аднапаўперыяднага выпрамнікаў і згладжваючага фільтра. Першасная абмотка сілавога трансфарматара мае вывады



Рыс. 5.16. Схема універсальнага паўправадніковага выпрамніка ВУП-2

для падключэння ў сетку напружаннем 127 і 220 В. Пераключэнне першаснай абмоткі на ўказаныя напружанні выконваецца шляхам перастаноўкі плаўкага засцерагальніка F_1 на 1 А. У сілавым трансфарматары маюцца тры другасныя абмоткі: абмотка *I* высокага напружання, абмотка *II* сярэдняга напружання і абмотка *III* нізкага напружання (6,3 В) для сілкавання ніці нагрэву катода электронных лямпаў. Для засцярогі ад перашкод, якія пранікаюць праз электрасетку, паміж першаснай і другаснай абмоткамі трансфарматара змяшчаюць электрастатычны экран у выглядзе аднаслойнай абмоткі і падключаюць адным канцом да корпуса.

Высакавольтны выпрамнік V, сабраны па маставой схеме на паўправадніковых дыёдах тыпу Д7ПС, дае на выхадзе 350 і 250 В нерэгуляванага выпрамленага напружання пры максімальнай сіле току 0,2 і 0,05 А і рэгуляванага выпрамленага напружання ад 0 да 250 В пры току нагрузкі 0,05 А. Рэгуляванне выхадных выпрамленых напружанняў ад 0 да 250 В ажыццяўляецца патэнцыёметрам з супраціўленнем 10^4 Ом. Для згладжвання пульсацый выпрамленага напружання прымяняецца фільтр, складзены з двух электралітычных кандэнсатараў *C1* і *C2* па 20 мкФ на рабочае напружанне 450 В і дроселя $6 \cdot 10^3$ віткоў.

Аднапаўперыядны выпрамнік сабраны з двух паўправадніковых дыёдаў *Д5* і *Д6* тыпу Д7Ж і трох электралітычных кандэнсатараў *C3, C4* і *C5* па 20 мкФ на рабочае напружанне 350 В. Падключэнне да сярэдняга пункта другаснай абмоткі сілавога трансфарматара дае магчымасць з патэнцыёметра r_2 (супраціўленне $4{,}7 \cdot 10^4$ Ом) здымаць рэгуляванае выпрамленае напружанне ад −100 да +100 В пры току нагрузкі 0,05 А. Для згладжвання пульсацый рэгуляванага выпрамленага напружання (0±100 В) на выхадзе паралельна клемам падключаюць кандэнсатар з папяровым дыэлектрыкам ёмістасцю 2 мкФ на напружанне 400 В. Для падключэння да выпрамніка генератара сантыметровых хваляў на пярэдняй панелі ўстаноўлена актанавая васьміштырковая лямпавая панель, на ножкі якой выведзены наступныя напружанні: 6 і 8 — 350 В; 3 і 8 — 250 В; 4 і 5 — 100 В; 2 і 7 − 6,3 В. На панелі выпрамніка размешчаны таксама клемы +350, +250, агул., ~ 6,3 В, выключальнік выпрамніка, клемы рэгулявання напружання, індыкатар уключэння. Плаўкі засцерагальнік на 0,5 А устаноўлены на выхадным шчытку ў ніжнія кантактныя клемы. Для атрымання выхаднога напружання 450 В паслядоўна злучаюцца клемы выпрамленага напружання 350 В і рэгуляванага 0±100 В.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Растлумачце ўстройства і прынцып работы выпрамніка ВС-24М.
2. На якіх дыёдах сабраны выпрамнік ВС-24М?
3. У якую сетку пераменнага току ўключаецца выпрамнік?
4. Якія напружанні і токі на выхадзе выпрамніка ВС-24М?
5. Якімі электравымяральнымі прыборамі забяспечваецца выпрамнік?
6. Якая максімальная магутнасць выпрамніка?
7. Назавіце асноўныя вузлы універсальнага паўправадніковага выпрамніка ВУП-2.
8. Па якой схеме і на якіх дыёдах сабраны высакавольтны выпрамнік?
9. На якіх дыёдах сабраны аднапаўперыядны выпрамнік ВУП-2?
10. Якое напружанне і токі можна здымаць з ВУП-2?

11. Для чаго ўстаноўлена на пярэдняй панелі выпрамніка актанавая васьмі-штырковая лямпавая панель?

12. Як атрымаць на ВУП-2 выхадное напружанне 450 В?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 10

Вывучэнне выпрамнікаў і выпрамляльных схем пераменнага току

М э т а р а б о т ы: навучыцца збіраць розныя схемы выпрамлення пераменнага току і вызначаць каэфіцыенты выпрамлення, пульсацыі і карыснага дзеяння выпрамнікаў.

У выніку выканання лабараторнай работы студэнт павінен навучыцца збіраць аднапаўперыядныя і двухпаўперыядныя схемы выпрамлення пераменнага току, вызначаць каэфіцыенты пульсацыі і карыснага дзеяння выпрамніка, вывучыць уласцівасць нізкачастотнага фільтра, назіраць на асцылографе графікі выпрамленага напружання (току).

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 5.1 і 5.2 падручніка.

Выкананне работы

I. Збярыце схему аднапаўперыяднага выпрамніка (рыс. 5.9, *а*) і ўключыце амперметры і вальтметры магнітаэлектрычнай і электрамагнітнай сістэм, ватметр.

1. Вымерайце сярэднія і дзейныя значэнні напружання і току. Вылічыце іх стасункі і параўнайце з тэарэтычнымі. Даныя вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табл. 1.

Т а б л і ц а 1

Выпрамнік	Вымярэнні					Вылічэнні						
	U_0, В	U, В	I_0, А	I, А	P, Вт	U_m, В	$U_0 : U$	I_m, А	$I_0 : I$	$K_п$	$K_ф$	η

2. Вылічыце амплітудныя значэнні напружання і току.

3. Вылічыце каэфіцыент пульсацыі напружання на нагрузцы. Раскладанне ў рад Фур'е выразу імпульсу напружання аднапаўперыяднага выпрамлення мае выгляд

$$U_н = 0{,}318U_{mн}+0{,}5U_{mн}\sin(\omega t+\alpha_1) -$$

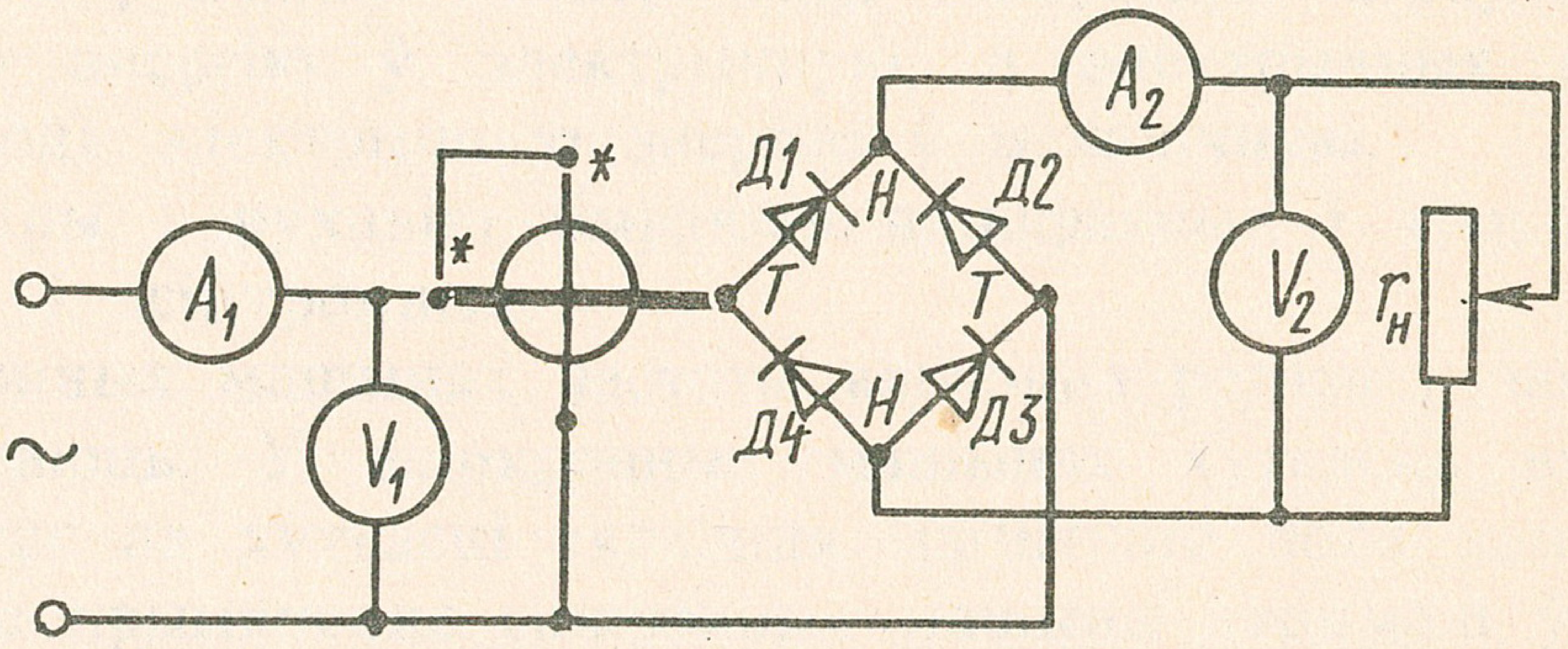
$$- 0{,}212U_{mн}\cos(2\omega t + \alpha_2)+\ldots$$

4. Падключыце да выпрамніка асцылограф і зарысуйце графік пераменнага і выпрамленага напружанняў.

5. Падключыце паралельна нагрузцы кандэнсатар і паўтарыце ўсе вымярэнні і вылічэнні. Зарысуйце графік выпрамленага напружання.

6. Вылічыце каэфіцыент пульсацыі, каэфіцыент фільтрацыі і ККД выпрамніка.

II. Збярыце выпрамнік па маставой схеме (рыс. 5.17). Падбярыце дыёды ў адпаведнасці з напружаннем сеткі.



Рыс. 5.17. Схема ланцуга для вывучэння маставой схемы двухпаўперыяднага выпрамлення

1. Падключыце выпрамнік у сетку і вымерайце сярэднія і дзейныя значэнні напружання і току. Вылічыце іх стасункі і параўнайце з тэарэтычнымі. Даныя вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табл. 1.

2. Вылічыце каэфіцыент пульсацыі напружання на нагрузцы.

3. Падключыце асцылограф да выпрамніка і зарысуйце графік пераменнага і выпрамленага напружання.

4. Вымерайце магутнасць, якую спажывае выпрамнік, і вызначце ККД выпрамніка.

5. Падключыце паралельна нагрузцы (к клемам НН) кандэнсатар (Г- або П-падобны фільтр) і паўтарыце ўсе вымярэнні і вылічэнні. Зарысуйце графік выпрамленага напружання.

6. Вылічыце каэфіцыент пульсацыі, каэфіцыент фільтрацыі і ККД выпрамніка.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Як вызначыць у маставой схеме клемы НН і ТТ?

2. Як вызначаюцца сярэднія і дзейныя значэнні напружання і току ў выпрамніку, якi складзены па схеме аднапаўперыяднага, двухпаўперыяднага выпрамніка?

3. Як вылічваецца каэфіцыент пульсацыі напружання на нагрузцы выпрамніка?

4. Для чаго служыць фільтр і якія вы ведаеце прасцейшыя схемы нізкачастотных фільтраў?

5. Як вызначаецца каэфіцыент фільтрацыі індуктыўнага фільтра?

6

МАШЫНЫ ПЕРАМЕННАГА ТОКУ

6.1. Прынцып работы і пабудовы трохфазных асінхронных рухавікоў

Машыны пераменнага току па прызначэнні падзяляюцца на генератары і рухавікі. Электрычныя генератары пераўтвараюць механічную энергію ў электрычную, а электрычныя рухавікі пераўтвараюць электрычную энергію ў механічную.

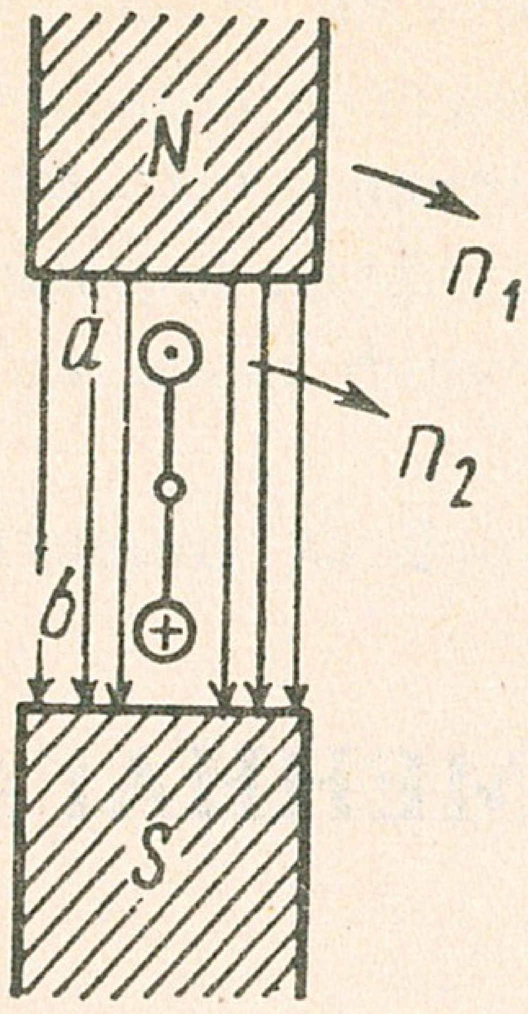
Генератары і рухавікі бываюць аднафазныя і трохфазныя, сінхронныя і асінхронныя.

У сінхронных машынах частоты вярчэння ротара і магнітнага поля супадаюць. У асінхронных машынах хуткасць вярчэння ротара адстае ад хуткасці вярчэння магнітнага поля машыны.

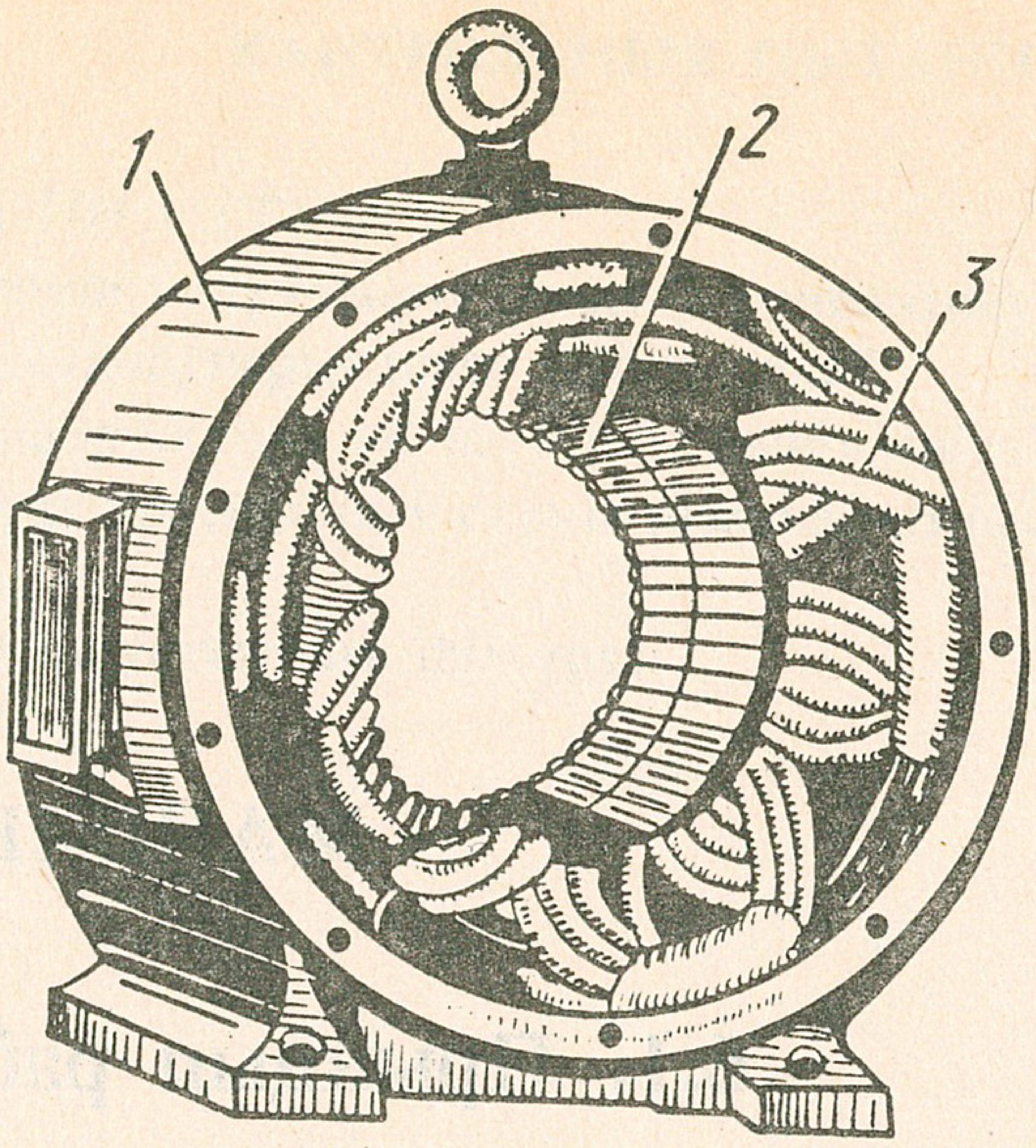
Шырокае прымяненне сінхронныя машыны атрымалі ў якасці генератараў пераменнага току, а асінхронныя — у якасці электрарухавікоў. У радзе выпадкаў у практыцы знаходзяць прымяненне магутныя сінхронныя рухавікі.

Вынаходцам трохфазнай сістэмы з'яўляецца рускі інжынер М. О. Даліва-Дабравольскі. У 1888 годзе ім быў створаны першы ў свеце трохфазны генератар. У 1891 годзе на Сусветнай электратэхнічнай выстаўцы ў Франкфурце-на-Майне М. О. Даліва-Дабравольскі з трыумфам прадэманстраваў перадачу трохфазнага пераменнага току напружаннем 15 кВ і магутнасцю 220,8 кВт ад Лауфенскага вадападу на адлегласць 175 км з каэфіцыентам карыснага дзеяння 77,4 %. Усё абсталяванне (трохфазны генератар, павышальныя і паніжальныя трохфазныя трансфарматары і трохфазны рухавік), якое было прадстаўлена на выстаўцы, створана М. О. Даліва-Дабравольскім.

У аснову пабудовы т р о х ф а з н ы х   а с і н х р о н н ы х   р у х а в і к о ў пакладзена ўласцівасць трохфазнай сістэмы ствараць вярчальнае магнітнае поле.



Рыс. 6.1. Схема для паяснення прынцыпу дзеяння асінхроннага рухавіка



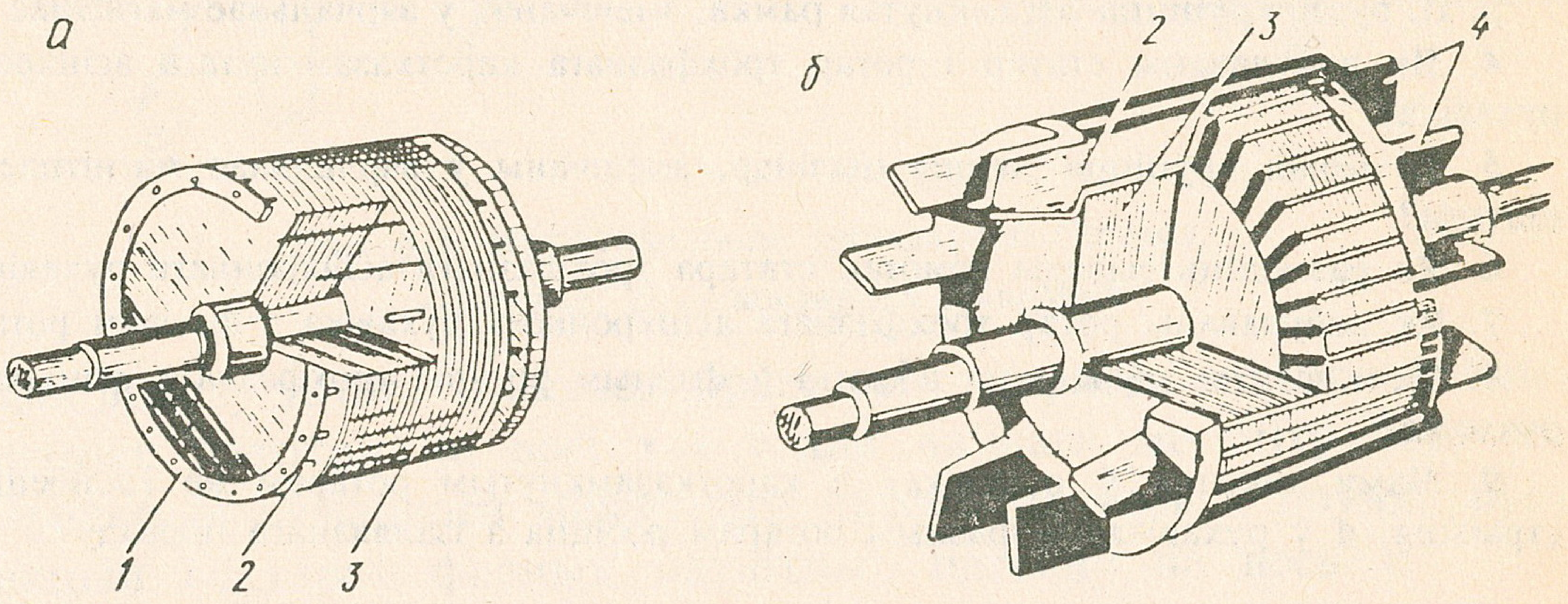
Рыс. 6.2. Статар асінхроннага рухавіка

Уявім вярчальнае магнітнае поле ў выглядзе магнітнага поля пастаяннага магніта, якое верціцца па ходу гадзіннікавай стрэлкі з частатой n_1. У вярчальнае поле змешчаны замкнуты віток ізаляванага проваду (рыс. 6.1). Магнітнае поле, якое перасякае праваднікі *a* і *b*, узбуджае ў іх індукцыйны ток, накіраванне якога вызначаецца па правілу правай рукі: у верхнім праваднiку ток будзе існі «да нас», у ніжнім — «ад нас». Праваднік з токам, які знаходзіцца ў магнітным полі, прыходзіць у рух, кірунак якога вызначаецца па правілу левай рукі. Такім чынам, замкнуты віток прыходзіць у вярчэнне ў кірунку вярчэння магнітнага поля. Вярчэнне вітка адстае ад вярчэння магнітнага поля, $n_2 < n_1$. Калі б $n_2 = n_1$, то магнітнае поле не перасякала б праваднікі вітка, у· іх не ўзбуджаўся б індукцыйны ток і віток не прыйшоў бы ў рух.

Адставанне вярчэння замкнутага вітка ад вярчэння магнітнага поля называецца *асінхранізмам.* Асінхронныя рухавікі складаюцца са статара і ротара. Статар з'яўляецца нерухомай, а ротар — рухомай часткай рухавіка. С т а т а р (рыс. 6.2) служыць для стварэння вярчальнага магнітнага поля. Абмоткі статара ўкладваюцца ў пазы стрыжня *2*, які збіраецца з асобных лістоў электратэхнічнай сталі, ізаляваных адзін ад аднаго лакам. Калі статар рухавіка складаецца з трох або кратных тром фазных абмотак *3*, то ён называецца *трохфазным асінхронным рухавіком.* Пачаткі і канцы фазных абмотак статара выводзяцца на шчыток, які размешчаны на корпусе *1* рухавіка. Для злучэння фазных абмотак зоркай канцы фазных абмотак C_4, C_5, C_6 на шчытку злучаюцца ў адзін вузел, а пачаткі фазных абмотак C_1, C_2, C_3 падключаюцца ў сетку. Для злучэння фазных абмотак трохвугольнікам

канец першай фазнай абмоткі C_4 злучаецца з пачаткам другой фазнай абмоткі C_2, канец другой C_5 — з пачаткам трэцяй C_3, канец трэцяй C_6 — з пачаткам першай фазы C_1, а клемы C_1, C_2, C_3 падключаюцца ў сетку.

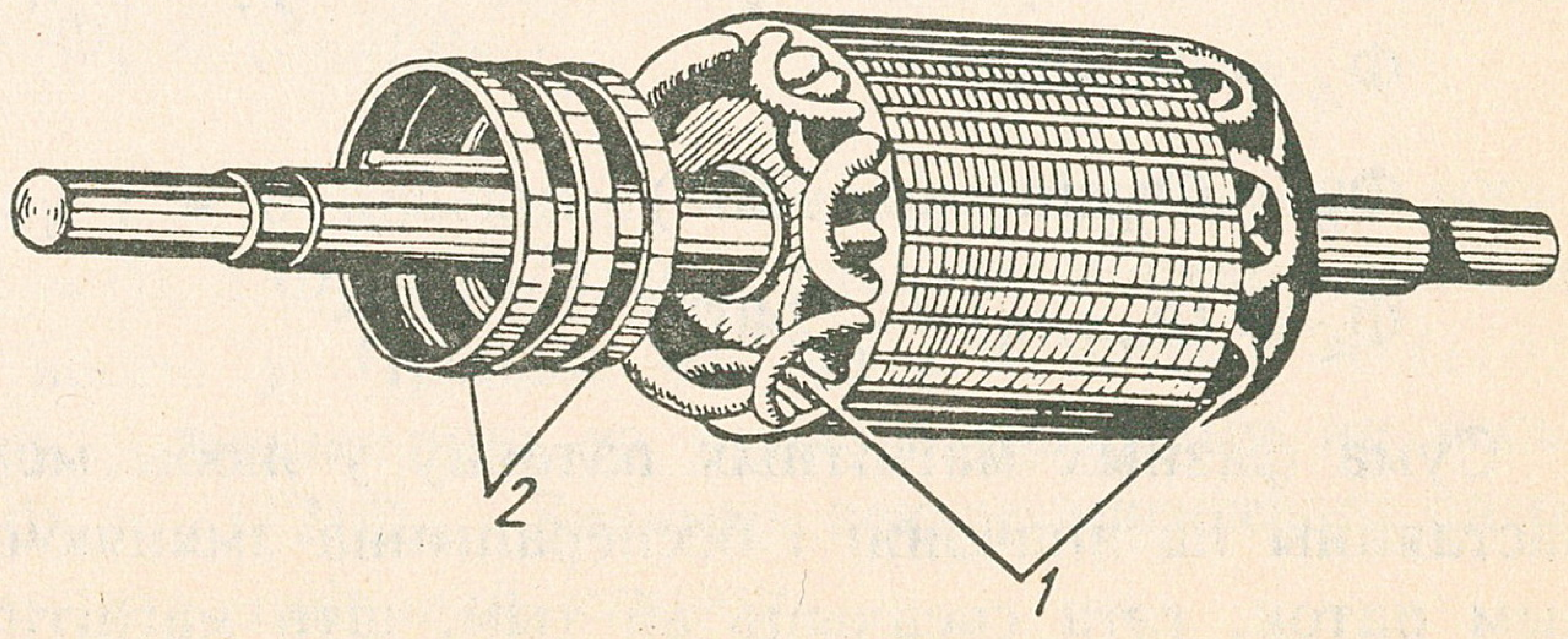
Р о т а р асінхроннага рухавіка (рыс. 6.3) збіраецца з асобных ізаляваных адзін ад аднаго лістоў электратэхнічнай сталі *3*. У пазы ротара закладваюцца медныя стрыжні *2*, замкнутыя з тарцоў меднымі кольцамі *1*. Такім чынам, абмотка ротара ўяўляе сабой вавёрчына кола (рыс. 6.3, *а*). У сучасных асінхронных



Рыс. 6.3. Каротказамкнутыя ротары асінхроннага рухавіка: *а* — з меднай абмоткай; *б* — з алюмініевай абмоткай

рухавіках абмотка ротара адліваецца з алюмінію (рыс. 6.3, *б*). Лапаткі *4* служаць для ахалоджвання рухавіка ў час работы. Асінхронныя рухавікі, якія маюць такі ротар, называюцца *рухавікамі з каротказамкнутым ротарам.*

Другім тыпам трохфазных асінхронных рухавікоў з'яўляецца рухавік з фазным ротарам (рыс. 6.4). Ф а з н ы р о т а р складаецца з трохфазнай абмоткі *1*, злучанай зоркай. Пачаткі фазных абмотак выведзены да кантактных кольцаў *2*, якія зна-



Рыс. 6.4. Фазны ротар асінхроннага рухавіка

ходзяцца на валу рухавіка. Вось чаму рухавікі з фазным ротарам называюцца таксама *рухавікамі з кантактнымі кольцамі.* Да кантактных кольцаў прыціскаюцца тры шчоткі, злучаныя з пускавым рэастатам.

ПЫТАННІ ДА САМАПРАВЕРКІ

1. Чаму дадзеныя трохфазныя рухавікі называюцца асінхроннымі?
2. Ці можа быць у асінхронным рухавіку $n_2 > n_1$? Чаму?
3. Ці будзе круціцца незамкнутая рамка, змешчаная ў вярчальнае магнітнае поле?
4. Як пабудаваны статар і ротар трохфазнага каротказамкнутага асінхроннага рухавіка?
5. Ці можа круціцца медны цыліндр, змешчаны ў вярчальнае магнітнае поле статара?
6. Як размеціць вывады абмотак статара трохфазнага асінхроннага рухавіка?
7. Як пабудаваны ротар трохфазнага асінхроннага рухавіка з фазным ротарам?
8. Якім чынам злучаюцца абмоткі ў фазным ротары трохфазнага асінхроннага рухавіка?
9. Чаму абмотка ў рухавіках з каротказамкнутым ротарам не ізалюецца ад стрыжня, а ў рухавіках з фазным ротарам робіцца з ізаляванага проваду?

6.2. Вярчальнае магнітнае поле трохфазнай сістэмы пераменнага току

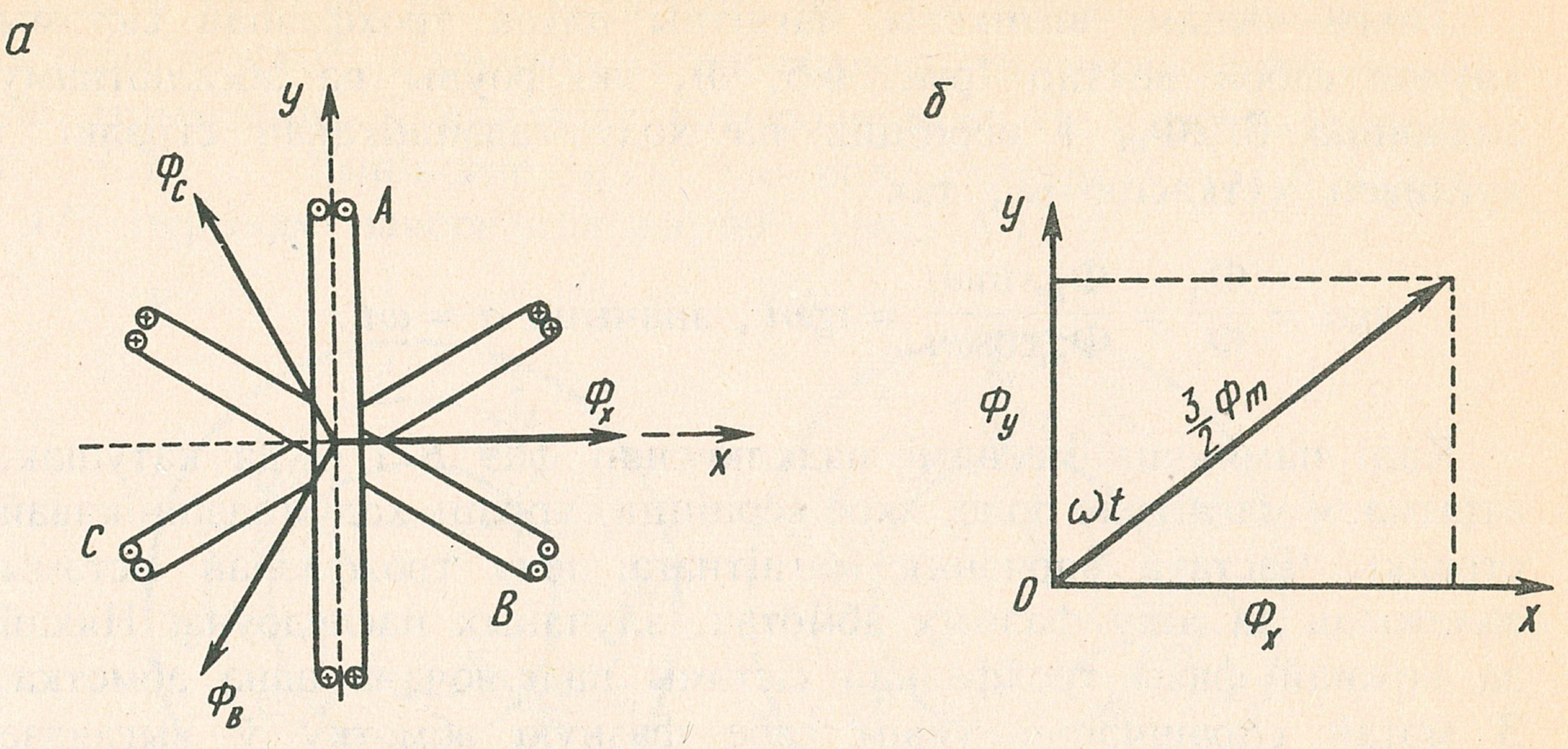
Для вывучэння ўтварэння трохфазнай сістэмай вярчальнага магнітнага поля разгледзім трохфазны электрычны ланцуг з сіметрычнай нагрузкай. У якасці нагрузак возьмем тры катушкі ізаляванага проваду, якія размешчаны адна адносна другой пад вуглом 120° (рыс. 6.5, *а*). Пры сінусоідным змяненні току ў трохфазнай сістэме магнітны паток фазных катушак таксама будзе змяняцца па сінусоіднаму закону са зрухам фаз 120°:

$$\Phi_A = \Phi_m \sin\omega t\,;$$

$$\Phi_B = \Phi_m \sin(\omega t - 120^\circ)\,;$$

$$\Phi_C = \Phi_m \sin(\omega t - 240^\circ)\,.$$

Сума фазных магнітных патокаў у любы момант часу стварае пастаянны па значэнні і бесперапынна змяняючы кірунак магнітным паток, гэта сведчыць аб тым, што магнітнае поле верціцца.



Рыс. 6.5. Магнітнае поле трохфазнай сістэмы:
а — схема; *б* — вектарная дыяграма

Для доказу гэтага знойдзем праекцыі сумарнага вектара фазных магнітных патокаў на восі x і y для пэўнага моманту часу t.

Праекцыя сумарнага магнітнага патоку на вось x роўная суме праекцый вектараў фазных магнітных патокаў на вось x:

$$\Phi_x = \Phi_{A_x} + \Phi_{B_x} + \Phi_{C_x} = \Phi_m \sin\omega t - \Phi_m \sin(\omega t - 120°)\cos 60° -$$
$$- \Phi_m \sin(\omega t - 240°)\cos 60° = \Phi_m \sin\omega t +$$
$$+ (1/4)\Phi_m \sin\omega t + (1/4)\Phi_m \sin\omega t = (3/2)\Phi_m \sin\omega t.$$

Праекцыя на вось y роўная суме праекцый вектараў фазных магнітных патокаў на вось y:

$$\Phi_y = \Phi_{A_y} + \Phi_{B_y} + \Phi_{C_y} = \Phi_m \sin\omega t \cos 90° -$$
$$-\Phi_m \sin(\omega t - 120°)\cos 30° + \Phi_m \sin(\omega t - 240°)\cos 30° =$$
$$= (\sqrt{3}/4)\Phi_m \sin\omega t + (\sqrt{3}/4)\Phi_m \cos\omega t - (\sqrt{3}/4)\Phi_m \sin\omega t +$$
$$+ (3/4)\Phi_m \cos\omega t = (3/2)\Phi_m \cos\omega t.$$

Модуль сумарнага вектара фазных магнітных патокаў

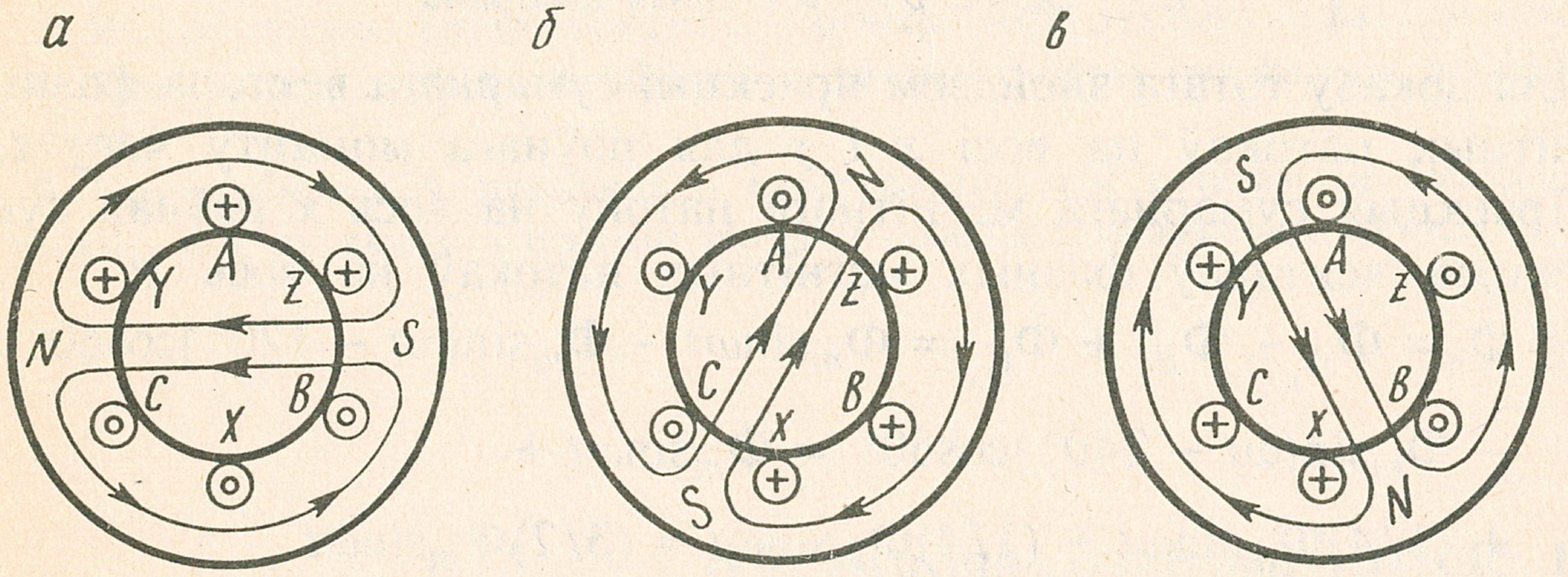
$$\Phi = \sqrt{\Phi_x^2 + \Phi_y^2} = (3/2)\Phi_m.$$

У момант часу $t = 0$ праекцыя магнітнага патоку на вось x роўная нулю: $\Phi_x = 0$, а $\Phi_y = (3/2)\Phi_m$, значыць вектар магнітнага патоку супаў з воссю y. Пройдзе час ад $t = 0$ да $t = (1/4)T$, праекцыя на вось y зменшыцца да нуля, а праекцыя на вось x павялічыцца да $\Phi_x = (3/2)\Phi_m$. Значыць вектар магнітнага патоку верціцца па ходу гадзіннікавай стрэлкі.

Такім чынам, выніковы магнітны паток трохфазнай сістэмы ўяўляе сабой вектар (рыс. 6.5, *б*), які роўны па абсалютнаму значэнню $3/2\Phi_m$ і верціцца па ходу гадзіннікавай стрэлкі з вуглавой хуткасцю ω , так

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\Phi_x}{\Phi_y} = \frac{\Phi_m \sin\omega t}{\Phi_m \cos\omega t} = \mathrm{tg}\omega t\,,\ \text{значыць}\ \alpha = \omega t\,.$$

Калі памяняць месцамі падключэнні фаз B і C да катушак, атрымаем магнітнае поле, якое верціцца супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі. Частата вярчэння магнітнага поля трохфазнай сістэмы залежыць ад ліку фазных абмотак, злучаных паслядоўна. Няхай да кожнай фазы трохфазнай сістэмы падключана адна абмотка. З мэтай спрашчэння ўявім сабе фазную абмотку ў выглядзе аднаго правaду, укладзенага ў паз станіны (рыс. 6.6).

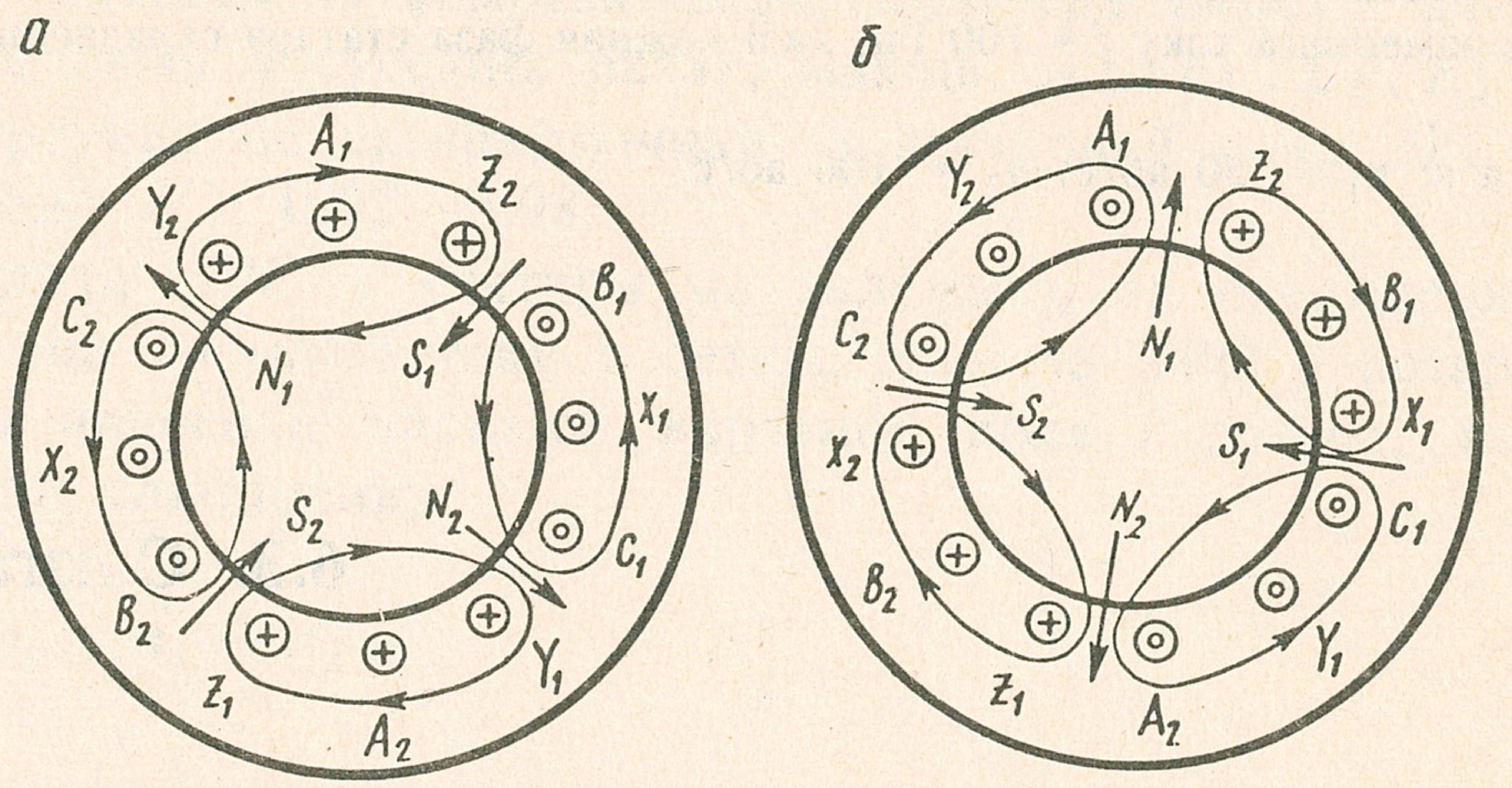


Рыс. 6.6. Схема атрымання вярчальнага магнітнага поля трохфазнай сістэмы

У момант часу, калі ток у фазе A прыме максімальнае станоўчае значэнне, у фазах B і C ток будзе мець адмоўнае значэнне, значыць у праваднiках Y, A і Z токі ідуць «ад нас», а ў праваднiках C, X, B — «да нас» (рыс. 6.6, *а*). Як бачна з рыс. 6.6, выніковае магнітнае поле трохфазнай сістэмы прадстаўляецца ў выглядзе двухполюснага магнітнага поля.

Праз 1/3 перыяду ў абмотцы фазы B будзе максімальнае станоўчае значэнне току, а ў фазах A і C токі будуць мець адмоўнае значэнне (рыс. 6.6, *б*). Выніковае магнітнае поле павернецца на 120° па ходу гадзіннікавай стрэлкі. Яшчэ праз 1/3 перыяду максімум станоўчага току апынецца ў фазе C, а ў фазах A і B токі атрымаюць адмоўнае значэнне (рыс. 6.6, *в*). Выніковае магнітнае поле павернецца яшчэ на 120° па ходу гадзіннікавай стрэлкі. Такім чынам, за ўвесь перыяд змянення току ў сетцы магнітнае поле трохфазнай сістэмы зробіць поўны абарот.

Калі ў кожную фазу ўключыць па дзве абмоткі, зрушаныя ў прасторы на 180°, і злучыць іх паслядоўна, то сумарнае магнітнае поле атрымаецца ў выглядзе чатырохполюснага магнітнага поля (рыс. 6.7, *а*). Выніковае магнітнае поле статара ў гэтай схеме за 1/3 перыяду павернецца на 60° (рыс. 6.7, *б*).



Рыс. 6.7. Схема атрымання чатырохполюснага вярчальнага магнітнага поля трохфазнай сістэмы

Пры далейшым змяненні току ў фазах чатырохполюснае магнітнае поле статара будзе вярцецца па ходу гадзіннікавай стрэлкі, прычым за перыяд яно павернецца на 180°, значыць здзейсніць толькі палавіну абароту.

Пры наяўнасці ў кожнай фазе трох абмотак, злучаных паслядоўна і зрушаных у прасторы на 120° адносна адна адной, магнітнае поле трохфазнай сістэмы за перыяд зробіць толькі 1/3 абароту.

У агульным выглядзе частата вярчэння магнітнага поля трохфазнай сістэмы вызначаецца формулай

$$n = f/p, \quad (6.1)$$

дзе n — частата вярчэння магнітнага поля, аб/с; f — частата пераменнага току; p — лік пар полюсаў магнітнага поля статара.

Для двухполюснага магнітнага поля трохфазнай сістэмы пры частаце току 50 Гц частата яго вярчэння складзе 50 аб/с, а для чатырохполюснага — 25 аб/с.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца вярчальным магнітным полем?
2. Чаму б раўнялася выніковае магнітнае поле трохфазнай сістэмы, калі б зрух фаз паміж вектарамі фазных магнітных патокаў быў роўны нулю?

3. Ад чаго залежыць частата вярчэння магнітнага поля трохфазнай сістэмы?

4. З якой частатой будзе вярцецца магнітнае поле трохфазнага статара, кожная фаза якога складаецца з трох паслядоўна злучаных абмотак? Паралельна злучаных абмотак пры частаце току $f = 50$ Гц?

Адказ: $n_1 = 16{,}67$ аб/с; $n_2 = 50$ аб/с.

5.Якую частату вярчэння магнітнага поля можа стварыць трохфазны статар пры частаце пераменнага току $f = 100$ Гц, калі кожная фаза статара складаецца з дзвюх абмотак?

Адказ: $n_1 = 50$ аб/с; $n_2 = 100$ аб/с.

6.3. Слізгаценне

Пры вярчэнні магнітнага поля статара з частатой n_1 ротар будзе вярцецца з частатой n_2, прычым $n_1 > n_2$. Велічыня, якая характарызуе адноснае адставанне ротара, называецца *слізгаценнем* і выражаецца формулай

$$s = (n_1 - n_2)/n_1 , \qquad (6.2)$$

дзе s — слізгаценне; n_1 — частата вярчэння магнітнага поля, аб/с; n_2 — частата вярчэння ротара, аб/с.

У момант пуску трохфазнага рухавіка, калі ротар знаходзіцца ў нерухомасці ($n_2 = 0$), слізгаценне роўнае адзінцы, а пры частаце ротара, роўнай частаце вярчэння магнітнага поля ($n_2 = n_1$), слізгаценне роўнае нулю. З павелічэннем нагрузкі на рухавік, значыць з павелічэннем тармазнога моманту ротара, частата вярчэння ротара змяншаецца, а слізгаценне павялічваецца. Пры халастым ходзе рухавікоў слізгаценне змяняецца ў межах 0,001—0,01, а пры нагрузцы — 0,05—0,2.

Ад значэння слізгацення залежаць ЭРС ротара, частата ЭРС і току ў ротары, вярчальны момант ротара.Магнітнае поле статара, якое верціцца, адначасова перасякае абмоткі статара і ротара і ўзбуджае ў іх сінусоідныя ЭРС індукцыі. Дзейныя значэнні ЭРС статара і ротара адпаведна раўныя:

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_m k_1 ;$$

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_m k_2 ,$$

дзе f_1 — частата току ў сетцы; f_2 — частата змянення магнітнага поля ў ротары; w_1 і w_2 — колькасць віткоў фазнай абмоткі статара і ротара; k_1 і k_2 — абмотачныя каэфіцыенты статара і ротара.

Абмотачны каэфіцыент улічвае змяншэнне ЭРС у выніку аб'ёмнага размяшчэння абмотак фазы. Калі тры абмоткі адной фазы, размешчаныя ў суседніх пазах, маюць ЭРС E_1, E_2, E_3, то ЭРС фазы роўная не арыфметычнай, а вектарнай суме ЭРС абмотак. Звычайна $k = 0{,}92—0{,}98$.

Частата ЭРС у статары не залежыць ад слізгацення, а вызначаецца частатой току ў сетцы. Частата ЭРС у ротары вызначаецца адноснай частатой вярчэння поля і ротара, так званай частатой слізгацення:

$$n_s = n_1 - n_2,$$

значыць $f_{2s} = n_s p = (n_1 - n_2) n_1 p / n_1 = s f_1$.

Такім чынам, з павелічэннем слізгацення частата ЭРС індукцыі ў ротары павялічваецца. З формулы (6.2) можна вызначыць частату вярчэння ротара пры нагрузцы рухавіка: $n_2 = n_1(1 - s)$.

ЭРС узбуджаецца ў ротары, які верціцца:

$$E_{2s} = 4{,}44 f_{2s} w_2 \Phi_m k_2 .$$

Паколькі $f_{2s} = f_1 s$, то $E_{2s} = 4{,}44 f_1 s w_2 \Phi_m k_2$.

У стане спакою ротара $s = 1$ і $f_{2s} = f_1$. Такім чынам,

$$E_{2s} = 4{,}44 f_1 w_2 \Phi_m k_2 s = E_{20} s,$$

значыць $E_{2s} = E_{20} s$.

ЭРС у ротары, які верціцца, роўная ЭРС нерухомага ротара, памножанай на слізгаценне.

З павелічэннем слізгацення павялічваецца індуктыўнае супраціўленне, а значыць і агульнае супраціўленне.

Абмотка ротара мае невялікае актыўнае супраціўленне r_2 і валодае вялікай індуктыўнасцю L_2, бо яна складаецца з тоўстых медных або алюмініевых каротка замкнутых стрыжняў, размешчаных у пазах жалезнай асновы.

Індуктыўнае супраціўленне абмоткі самавярчальнага ротара

$$x_{2s} = \omega_2 L = 2\pi f_{2s} L .$$

Калі заменім f_{2s} на $f_1 s$, атрымаем $x_{2s} = 2\pi f_1 L s$, значыць $x_{2s} = x_{20}s$, дзе x_{20} — індуктыўнае супраціўленне ротара пры адносным спакоі.

Ток у ротары вызначаецца паводле закону Ома:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{z_{2s}} = \frac{E_{20}s}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2 s^2}} = \frac{E_{20}}{x_{20}\sqrt{1 + \dfrac{r_2^2}{x_{20}^2 s^2}}} =$$

$$= \frac{I_{20}}{\sqrt{1 + \dfrac{r_2^2}{x_{20}^2 s^2}}}. \qquad (6.3)$$

З формулы (6.3) бачна, што ток у ротары з павелічэннем слізгацення ўзрастае. У момант пуску асінхроннага рухавіка, калі $s = 1$, у ротары з'яўляецца максімальны ток, які ў 4—7 разоў перавышае намінальны. Пускавы ток кароткачасовы і не можа награваць рухавік да вялікай тэмпературы. Пры пуску магутных асінхронных рухавікоў рэзка зніжаецца напружанне сеткі, што адмоўна адбіваецца на рабоце апаратаў, уключаных у гэту сетку.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца слізгаценнем?

2. Як змяняецца слізгаценне пры павелічэнні нагрузкі асінхроннага рухавіка?

3. Як залежыць частата ЭРС і сіла току ў ротары ад слізгацення? Супраціўленне ротара ад слізгацення?

4. Трохфазны асінхронны рухавік, які падключаны да сеткі пераменнага току частатой $f = 50$ Гц, робіць 24 аб/с пры намінальнай нагрузцы. Вызначце слізгаценне.

Адказ: $s = 0{,}04$.

5. Ротар шасціполюснага трохфазнага асінхроннага рухавіка верціцца з частатой $n_2 = 16$аб/с. Слізгаценне ротара $s = 6$ %. Вызначце частату вярчэння поля статара і частату току ў фазах статара.

Адказ: $n_1 =$ 17 аб/с; $n_2 =$ 51 Гц.

6. Трохфазны асінхронны рухавік, падключаны ў сетку пераменнага току частатой $f = 50$ Гц, мае слізгаценне $s = 4$ % пры намінальнай нагрузцы. У статары рухавіка шэсць абмотак, магнітны паток на фазу $\Phi_m = 56 \cdot 10^{-4}$ Вб, колькасць віткоў і абмотачны каэфіцыент абмотак статара і ротара адпаведна роўныя:

$$w_1 = 300\ ;\ w_2 = 20\ ;\ k_1 = 0{,}9\ ;\ k_2 = 0{,}91\ .$$

Вызначце частату вярчэння ротара, значэнне ЭРС фаз статара і ротара пры нерухомым ротары і пры яго вярчэнні.

Адказ: $n_2 = 24$ аб/с; $E_1 = 335{,}7$ В; $E_{20} = 22{,}7$ В; $E_2 = 0{,}91$ В.

7. Вызначце ЭРС, якая ўзбуджаецца ў абмотках статара і ротара трохфазнага асінхроннага рухавіка пры нерухомым ротары і пры вярчэнні са слізгаценнем $s =$ $= 6$ %, калі магнітны паток $\Phi_m = 64{,}6 \cdot 10^{-4}$ Вб, лік віткоў абмоткі фазы статара

і ротара і абмотачныя каэфіцыенты абмоткі статара і ротара адпаведна роўныя: $w_1 = 162$; $w_2 = 72$; $k_1 = 0{,}946$; $k_2 = 0{,}966$, а частата току ў статары $f = 50$ Гц.

Адказ: $E_1 = 219{,}7$ В ; $E_{20} = 99{,}7$ В ; $E_2 = 5{,}98$ В .

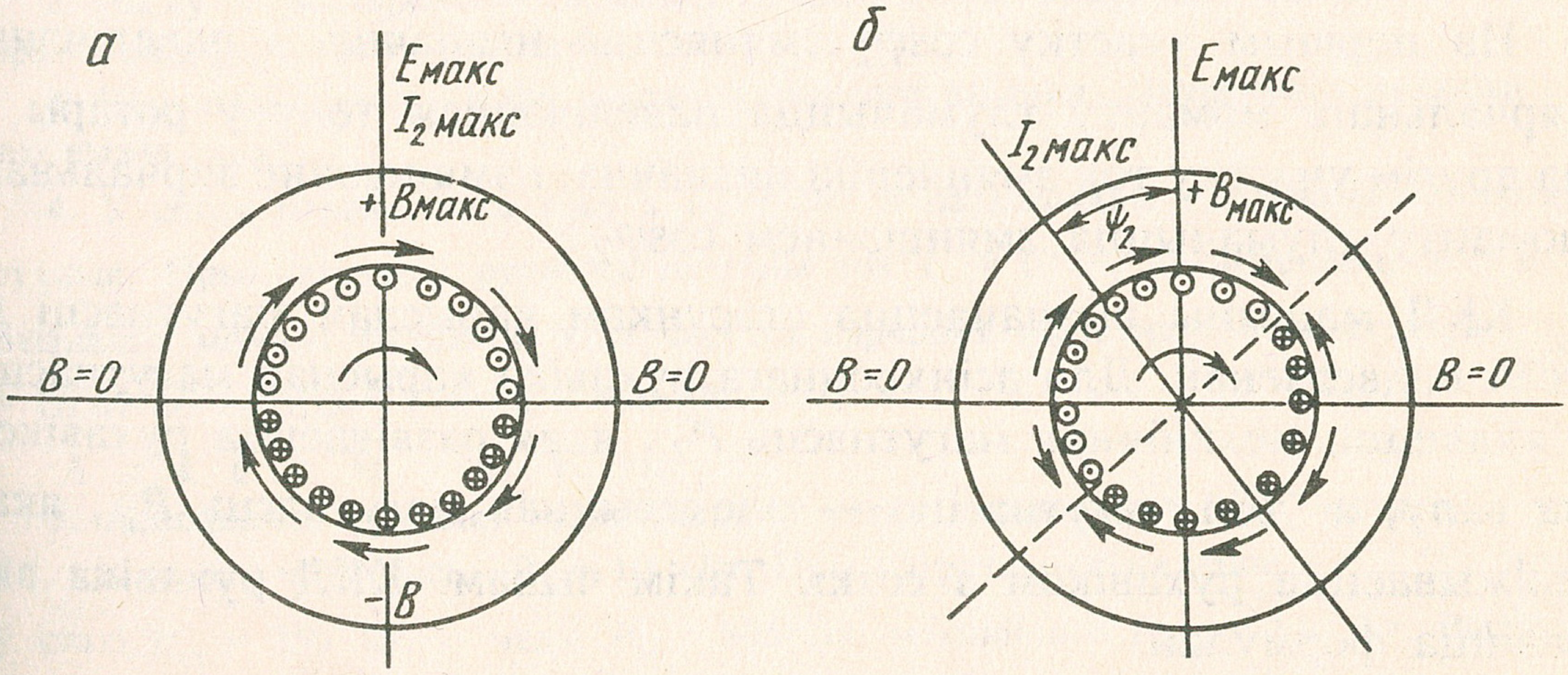
6.4. Вярчальны момант і ККД асінхронных рухавікоў

Вярчальны момант асінхронных рухавікоў вызначаецца ўзаемадзеяннем току ў ротары з магнітным полем статара і залежыць ад зруху фаз паміж токам і ЭРС ротара (ψ_2) :

$$M = kI_2\Phi_m\cos\psi_2 . \qquad (6.4)$$

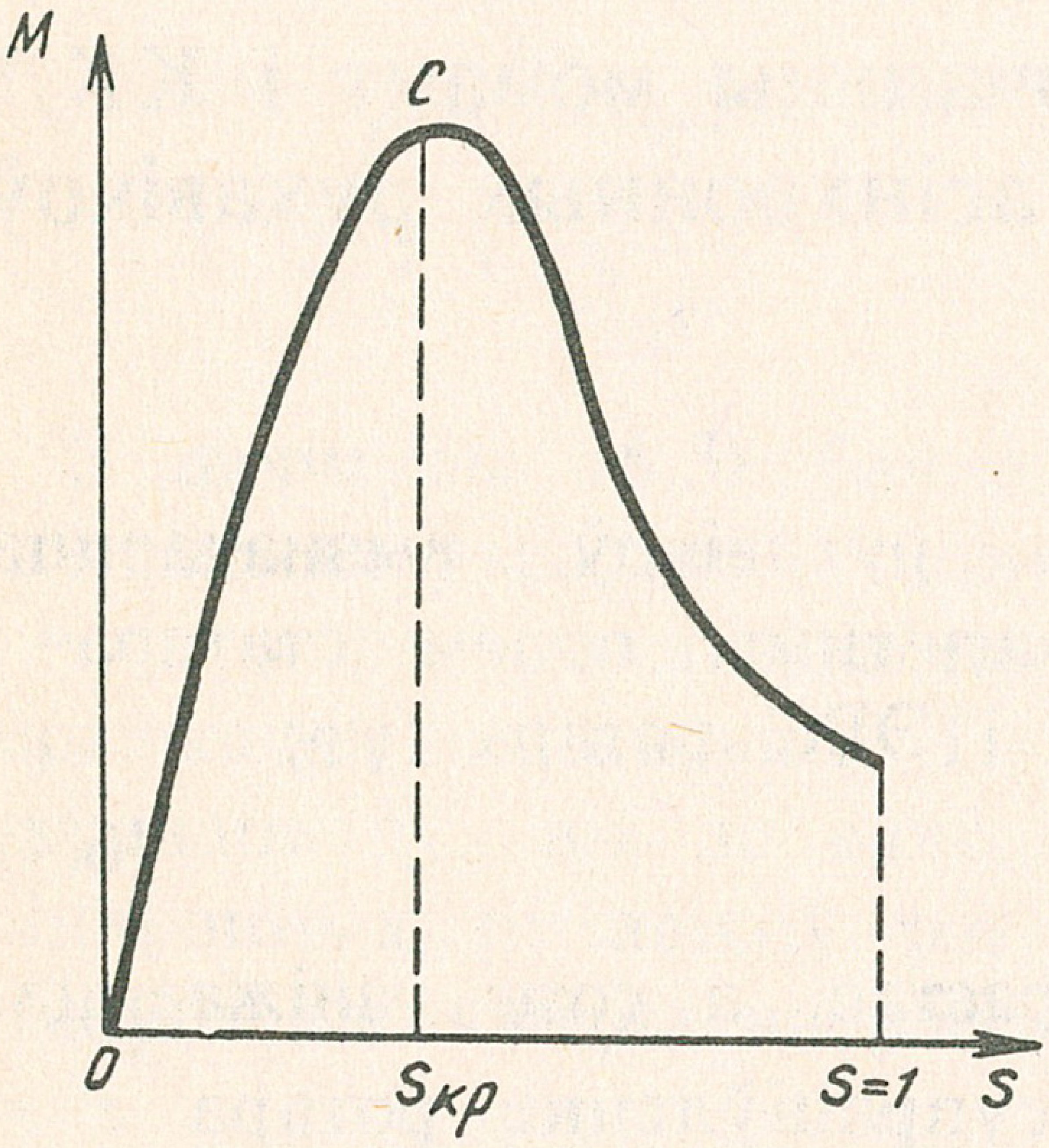
З павелічэннем слізгацення I_2 узрастае, а $\cos\psi_2$ зніжаецца, паколькі $\cos\psi_2 = r_2/z_2$, а агульнае супраціўленне ротара $z = \sqrt{r_2^2 + x_{20}^2 s^2}$ з павелічэннем слізгацення расце.

Уплыў зруху фаз паміж токам і ЭРС у ротары на вярчальны момант рухавіка можна растлумачыць наступным чынам. Няхай зрух фаз паміж токам I_2 і ЭРС E у ротары будзе роўны нулю, значыць ток ва ўсіх правадах верхняй палавіны ротара супадае з кірункам ЭРС, і ва ўсіх правадах ніжняй палавіны кірунак току супадае з кірункам ЭРС у іх (рыс. 6.8, *а*). Вярчальны момант у гэтым выпадку вызначаецца сумай вярчальных момантаў усіх праваднікоў ротара, што адпавядае максімальнаму вярчальнаму моманту ($\cos\psi_2 = 1$) .



Рыс. 6.8. Залежнасць вярчальнага моманту асінхроннага рухавіка ад зруху фаз паміж токам і ЭРС у ротары

При зруху фаз паміж ЭРС і токам у ротары на некаторы вугал ψ_2 правая частка правадоў верхняй палавіны ротара пры вярчэнні яго па руху гадзіннікавай стрэлкі будзе мець токі процілеглага кірунку (рыс. 6.8, *б*). Правады з токам процілеглага кірунку створаць тармазны момант, што зменшыць агульны вярчальны момант рухавіка ($\cos\psi_2 < 1$) .



Рыс. 6.9. Графік залежнасці вярчальнага моманту асінхроннага рухавіка ад слізгацення

Залежнасць вярчальнага моманту асінхроннага рухавіка ад слізгацення адлюстравана на графіку (рыс. 6.9). З гэтага графіка бачна, што пры павелічэнні слізгацення, якое выклікана павелічэннем нагрузкі рухавіка, вярчальны момант яго павялічваецца, і, пераадолеўшы тармазное супрацiўленне, рухавік працягвае вярцецца пры некалькі паніжанай частаце вярчэння. У такім рэжыме рухавік працуе толькі на участку *OC*, які называецца *рабочым*. Пры далейшым павелічэнні нагрузкі рухавіка слізгаценне становіцца большае за крытычнае, і ротар не павялічвае вярчальны момант, а змяншае яго. Частата вярчэння хутка спадае, і рухавік спыняецца.

Такім чынам, характарыстыку вярчальнага моманту асінхроннага рухавіка можна разбіць на два участкі: першы участак са змяненнем слізгацення ад нуля да крытычнага слізгацення $S_{кр}$, які адпавядае максімальнаму вярчальнаму моманту, а другі ўчасак — ад нуля да 1.

На першым участку $\cos\psi_2$ змяняецца нязначна, і павелічэнне вярчальнага моманту тлумачыцца павелічэннем току ў ротары, а на другім участку ток змяняецца нязначна, і змяншэнне вярчальнага моманту тлумачыцца змяншэннем $\cos\psi_2$.

ККД машыны вызначаецца стасункам карыснай магутнасці да ўсёй падведзенай. Для асінхроннага рухавіка карыснай магутнасцю з'яўляецца механічная магутнасць P_2 , якая развіваецца рухавіком на валу, а ўсёй магутнасцю — электрычная магутнасць P_1 , якая спажываецца рухавіком з сеткі. Такім чынам, ККД рухавіка выразіцца формулай

$$\eta = P_2/P_1 .$$

Электрычная магутнасць, якая падведзена да трохфазнага асінхроннага рухавіка, вызначаецца паводле формулы $P_1 = \sqrt{3}\, I_л U_л \cos\varphi$ і вымяраецца ватметрам.

Механічная магутнасць вярчальнага руху

$$P_2 = M\omega = M2\pi n_2 = Fr2\pi n_2 ,$$

дзе M — механічны момант ротара, роўны здабытку сілы на вобадзе F і радыуса r шківа; ω — вуглавая хуткасць вярчэння ротара; n_2 — частата вярчэння ротара.

Для вымярэння механічнай магутнасці можна карыстацца істужкавым тормазам і тахометрам. Механічная магутнасць, якая аддаецца рухавіком, меншая за падведзеную, паколькі ў самім рухавіку маюцца страты магутнасці : у абмотках статара і ротара, якія выкліканы праходжаннем току па іх; у стрыжнях статара і ротара, якія выкліканы перамагнічваннем стрыжняў і віхравымі токамі ў іх; механічныя страты, якія выкліканы стратамі ў падшыпніках, супраціўленнем паветра і стратамі ў вентылятары.

Усе страты ў рухавіку ідуць на яго награванне. У працэсе эксплуатацыі рухавікоў дапушчальнай мяжой награвання стрыжня ротара і корпуса статара пры ізаляцыі абмоткі класа A (бавоўна, шоўк, папера і іншыя арганічныя матэрыялы, насычаныя маслам), з'яўляецца тэмпература 110 °С.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як залежыць вярчальны момант асінхроннага рухавіка ад зруху фаз паміж ЭРС і токам у ротары? Ад току ў ротары?

2. Чаму ў асінхронным рухавіку з фазным ротарам для паляпшэння пуску прымяняецца пускавы рэастат?

3. Што называецца каэфіцыентам карыснага дзеяння асінхроннага рухавіка і як яго вызначыць?

4. У сетку пераменнага току з $U_л = 380$ В падключаны трохфазны асінхронны рухавік. Пры нагрузцы рухавіка лінейны ток $I_л = 10$ А, а слізгаценне $s = 6$ %. Вызначце момант рухавіка, калі частата вярчэння магнітнага поля статара $n_1 = 16{,}67$ аб/с, $\cos\varphi = 0{,}8$, а $\eta = 0{,}88$.

Адказ: $M = 47$ Н·м.

5. Асінхронны рухавік, падключаны ў сетку пераменнага току частатой $f = 50$ Гц, спажывае магутнасць $P_1 = 10$ кВт. Пры нагрузцы слізгаценне $s = 5$ %, страты ў сталі $P_{ст} = 250$ Вт, у медзі $P_м = 825$ Вт, механічныя $P_{мех} = 125$ Вт. Вызначце частату вярчэння ротара і каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка, калі статар мае шэсць абмотак.

Адказ: $n_2 = 23{,}75$ аб/с; $\eta = 89{,}29$ %.

6. Трохфазны асінхронны рухавік з трохфазным ротарам мае наступныя даныя: намінальную магутнасць $P_н = 600$ кВт, намінальнае напружанне $U_{1н} = 6$ кВ, намінальны ток $I_{1н} = 73$ А, намінальную частату вярчэння $n_{2н} = 10$ аб/с. Вызначце каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi$, ККД рухавіка, вярчальны момант, калі рухавік спажывае з сеткі магутнасць $P_1 = 657$ кВт.

А д к а з: $\cos\varphi = 0{,}867$; $\eta = 91{,}3$ %; $M = 9{,}6$ кН · м.

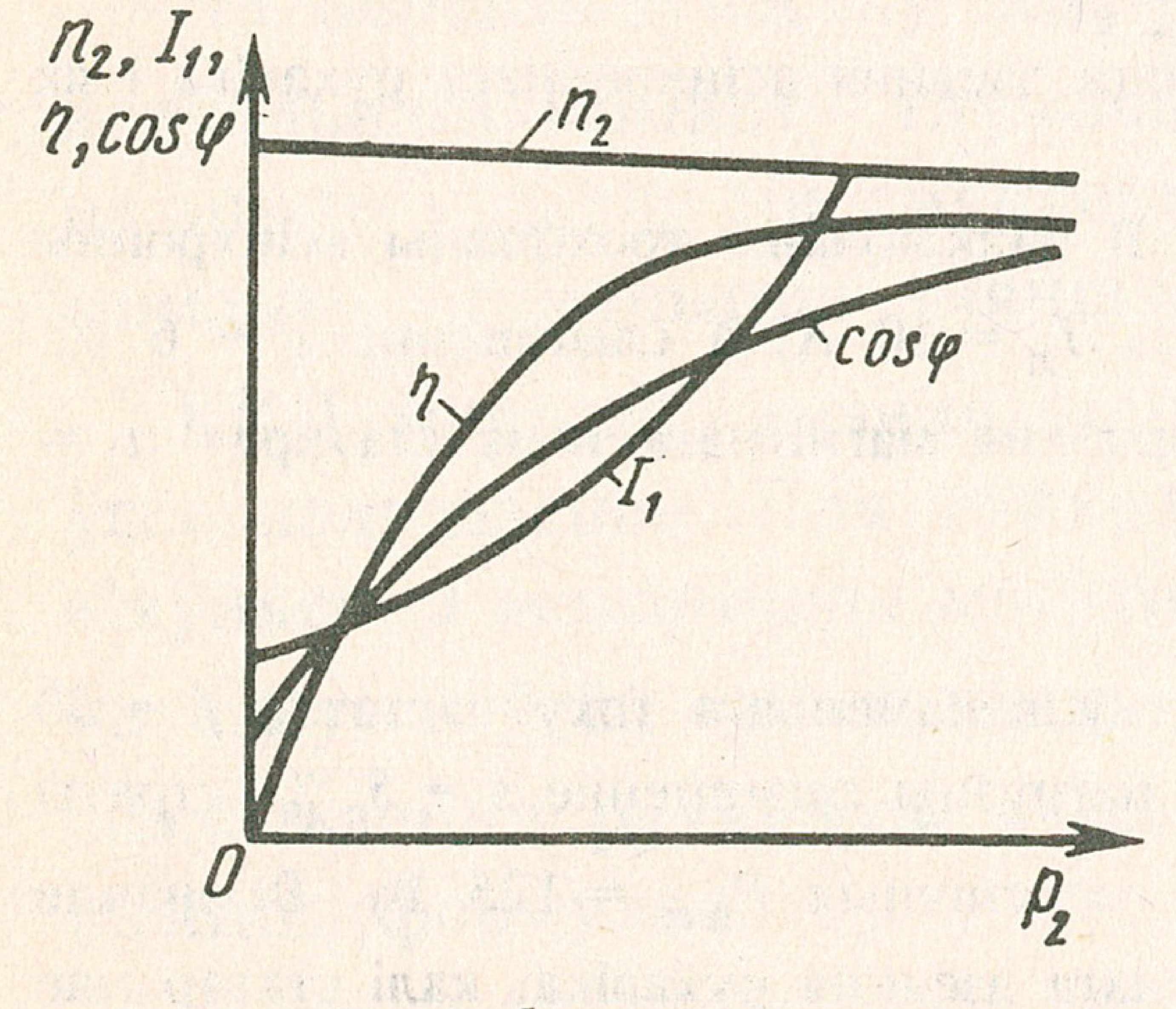
7. Трохфазны шасціполюсны асінхронны рухавік з фазным ротарам, уключаны ў сетку з лінейным напружаннем $U_л = 380$ В і частатой $f = 50$ Гц, мае намінальную магутнасць на валу рухавіка $P_{2н} = 5$ кВт пры частаце вярчэння $n_2 = 16$ аб/с. Вызначце намінальны момант вярчэння рухавіка, ККД, калі рухавік спажывае ток з сеткі $I_1 = 15$ А пры $\cos\varphi = 0{,}68$.

А д к а з: $M = 49{,}73$ Н · м; $\eta = 74{,}57$ %.

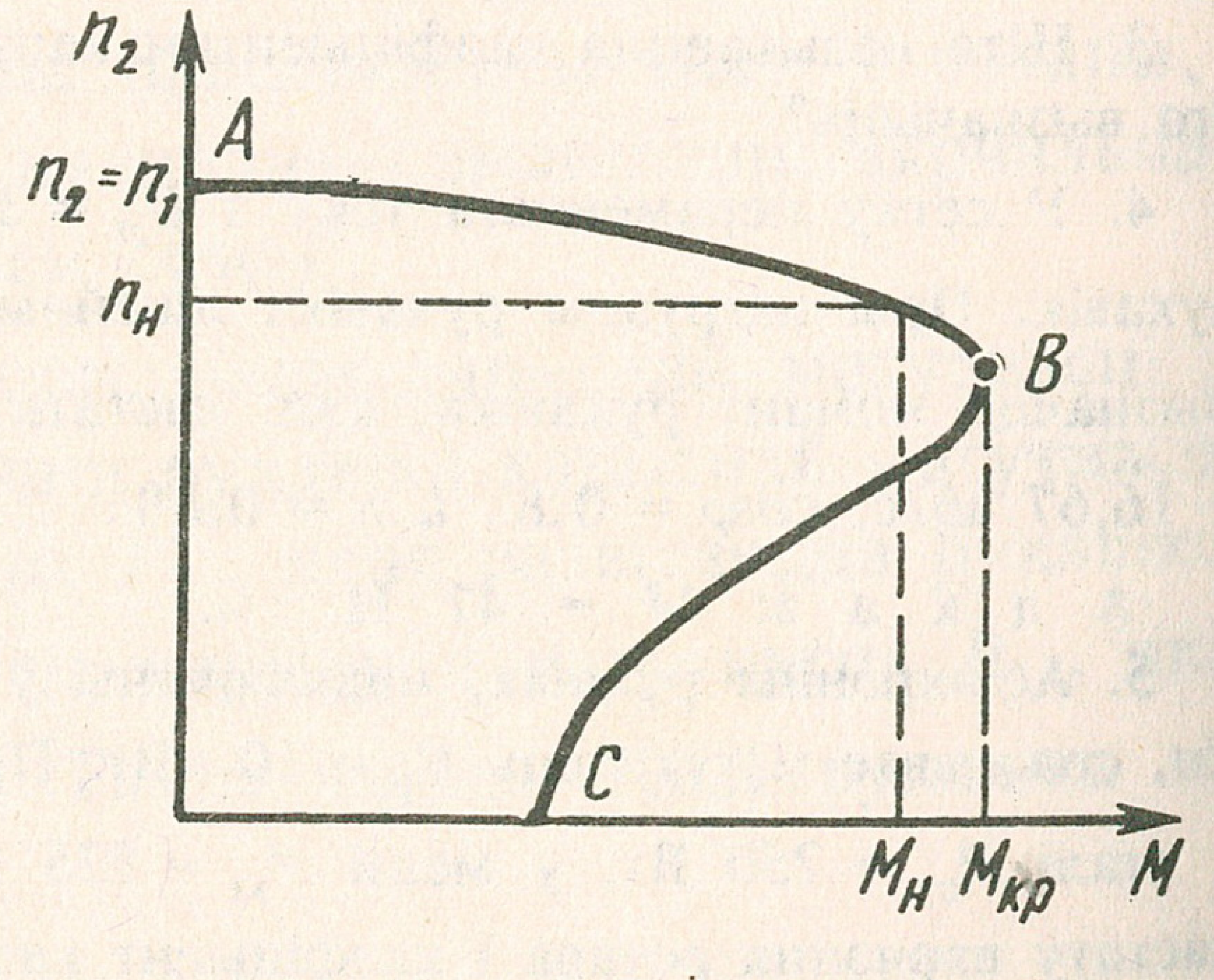
6.5. Рабочыя характарыстыкі

Да рабочых характарыстык асінхроннага рухавіка адносяцца залежнасці: частаты вярчэння ротара ад магутнасці $n_2 = f(P_2)$; току ў статары ад магутнасці $I_1 = f(P_2)$; каэфіцыента $\cos\varphi$ ад магутнасці $\cos\varphi = f(P_2)$; ККД рухавіка ад магутнасці $\eta = f(P_2)$, а таксама механічная характарыстыка $n_2 = f(M)$. Графічнае выражэнне гэтых характарыстык дадзена на рыс. 6.10 і 6.11.

З графікаў бачна, што асінхронныя рухавікі валодаюць жорсткай хуткаснай характарыстыкай, значыць пры павелічэнні магутнасці ад нуля да намінальнага значэння частата вярчэння змяняецца нязначна (на 4—8 %). Гэта тлумачыцца тым, што пры павелічэнні



Рыс. 6.10. Рабочыя характарыстыкі асінхроннага рухавіка



Рыс. 6.11. Механічная характарыстыка асінхроннага рухавіка

здымаемай магутнасці ротар рухавіка тармазіцца і павялічваецца слізгаценне. Пры павелічэнні слізгацення павялічваецца ток у ротары, а значыць, вярчальны момант і частата вярчэння ротара амаль поўнасцю аднаўляюцца.

Пры тармажэнні ротара, значыць пры павелічэнні магутнасці, павялічваецца слізгаценне, што выклікае павелічэнне току і магнітнага патоку ротара, які размагнічвае статар. Пры гэтым рэактыўнае супраціўленне статара змяншаецца, а ток узрастае (крывая I_1 на рыс. 6.10).

З павелічэннем нагрузкі рухавіка расце $\cos\varphi$ рухавіка і дасягае максімальнага значэння пры нагрузцы, блізкай да намінальнай. Гэта тлумачыцца тым, што пры павелічэнні нагрузкі змяншаецца доля рэактыўнага намагнічвальнага току, які складае прыкладна 40 % намінальнага і ад нагрузкі не залежыць. Актыўная складаемая току залежыць ад нагрузкі і з павелічэннем нагрузкі расце. Пры нагрузцы, большай за намінальную, $\cos\varphi$ змяншаецца, бо прыкметна павялічваецца магнітны паток рассеяння. Адпаведна з ростам каэфіцыента магутнасці рухавіка павялічваецца яго ККД (крывая η).

Залежнасць частаты вярчэння ротара ад нагрузкі рухавіка, гэта значыць ад тармазнога моманту, паказана на графіку рыс. 6.11 і называецца *механічнай характарыстыкай* асінхроннага рухавіка.

Механічную характарыстыку рухавіка можна атрымаць на падставе характарыстыкі рыс. 6.9, калі апошнюю павярнуць на 90° па ходу гадзіннікавай стрэлкі. Тады на рыс. 6.11 найбольшая ардыната будзе адпавядаць $n_2 = n_1$ $(s = 0)$, значыць халастому рэжыму рухавіка. Пры гэтым мы ігнаруем момантам страт на трэнне.

Участак AB механічнай характарыстыкі адпавядае ўстойліваму рэжыму работы асінхроннага рухавіка. Павелічэнне нагрузкі (тармазнога моманту) рухавіка вядзе да змяншэння частаты вярчэння, што ў сваю чаргу выклікае павелічэнне вярчальнага моманту рухавіка, які здольны ўраўнаважыць тармазны момант, і частата вярчэння ротара аднаўляецца. Пры нагрузцы рухавіка, калі тармазны момант перавышае крытычны $(M_{кр})$, вярчальны момант рухавіка змяншаецца і частата вярчэння ротара спадае, рухавік спыняецца. Пункт B на графіку адпавядае крытычнаму моманту нагрузкі і называецца пунктам крытычнага або абарачальнага моманту.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што паказваюць рабочыя характарыстыкі асінхроннага рухавіка?
2. Чым тлумачыцца жорсткасць хуткаснай характарыстыкі асінхроннага рухавіка?

3. Як растлумачыць павелічэнне току, спажываемага рухавіком з сеткі пры павелічэнні нагрузкі?

4. Што называецца механічнай характарыстыкай?

6.6. Кіраванне асінхроннымі рухавікамі

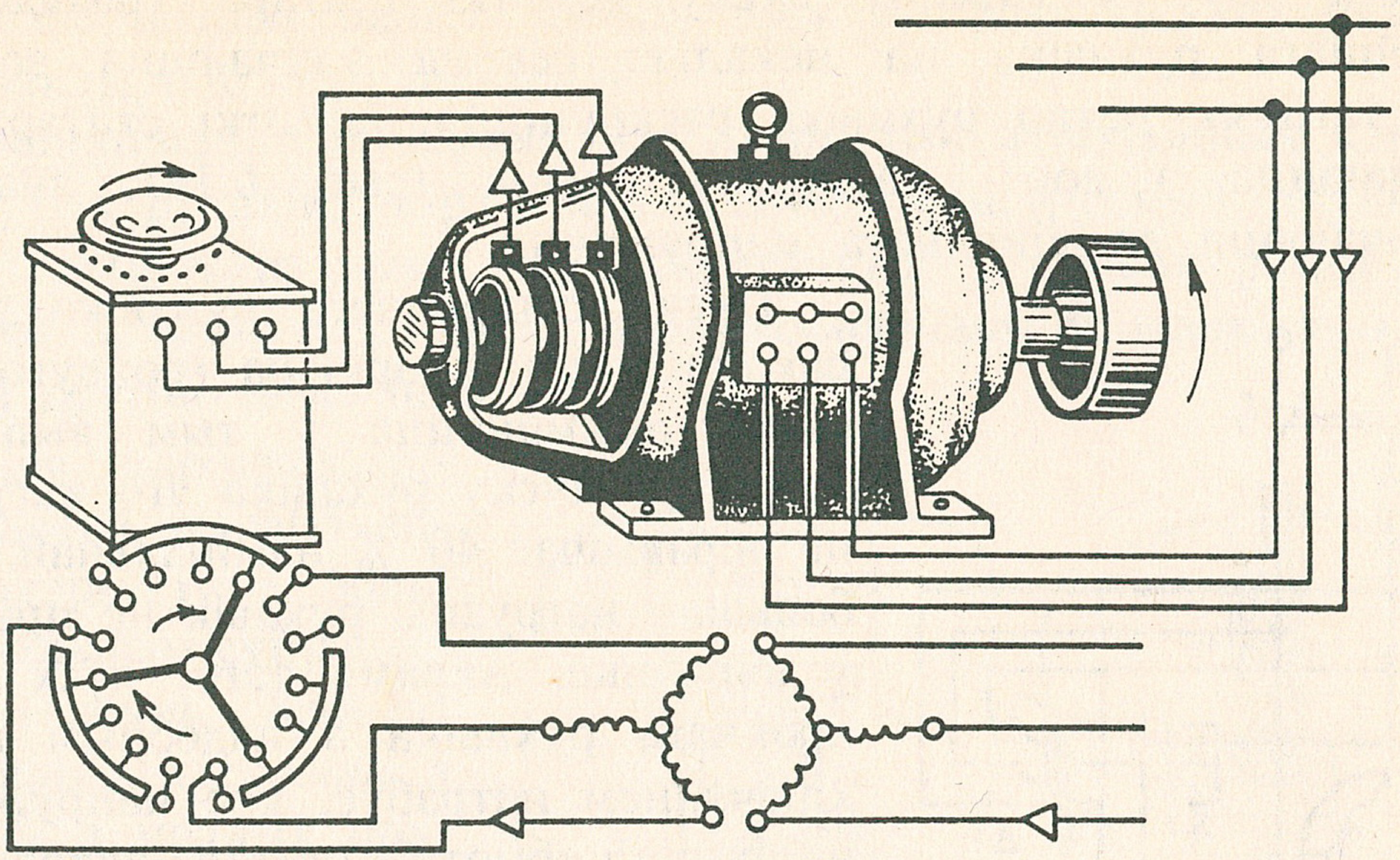
Да кіравання рухавікамі належаць пуск у ход, змяненне частаты вярчэння, рэверсаванне і спыненне рухавіка. Пры пуску у ход рухавіка пад нагрузкай неабходна, каб вярчальны момант рухавіка быў большы за тармазны момант нагрузкі, інакш рухавік не прыйдзе ў вярчэнне. Вярчальны момант асінхроннага рухавіка выражаецца формулай $M_в = kI_2\Phi_m\cos\psi_2$. Пры пуску рухавіка $s =$ $= 1$ і ток у абмотцы ротара прымае максімальнае значэнне. Кратнасць пускавога току ў асінхронных рухавіках з каротказамкнутым ротарам дасягае 5,5—7, значыць $I_п / I_н = 5{,}5-7$ або $I_п = (5{,}5-7) I_н$, дзе $I_п$ — пускавы ток, $I_н$ — намінальны ток. Але $\cos\psi_2$ з павелічэннем слізгацення змяншаецца:

$$\cos\psi_2 = r_2 / z_2 = r_2 / \sqrt{r_2^2 + x_{20}^2 s^2} .$$

Такім чынам, пры пуску рухавіка $\cos\psi_2$ прымае мінімальнае значэнне і кратнасць пускавога моманту рухавіка знаходзіцца ў межах 1—2, значыць $M_п = (1-2) M_н$.

Хаця пускавы ток і кароткачасовы, але пуск магутных рухавікоў парушае рэжым сеткі (змяншае напружанне, павялічвае нагрэў правадоў). Натуральна, узнікае неабходнасць зменшыць пускавы ток і зберагчы вярчальны момант рухавіка. З гэтай мэтай паслядоўна з абмоткай ротара падключаецца рэастат. Пры гэтым змяншаецца пускавы ток і зрух фаз ψ_2 паміж ЭРС і токам у ротары, а $\cos \psi_2$ павялічваецца.

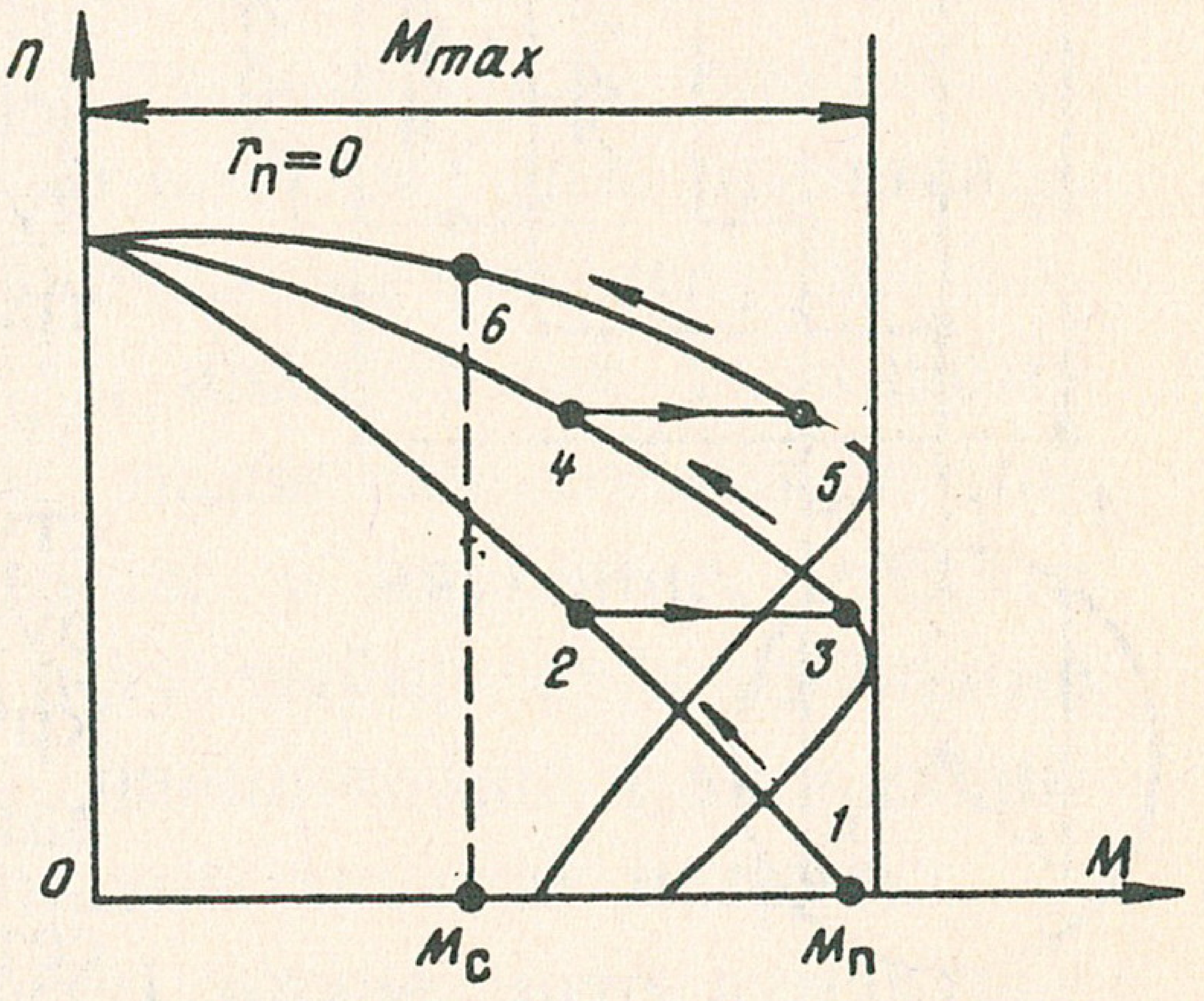
П у с к у х о д а с і н х р о н н ы х р у х а в і к о ў з фазным ротарам ажыццяўляецца з дапамогай пускавога рэастата (рыс. 6.12). Поўнае супраціўленне пускавога рэастата абмяжоўвае пускавы ток у межах (1,6—2,2) $I_н$. Як толькі ротар прыходзіць у вярчэнне, слізгаценне змяншаецца, змяншаецца і ток у ротары, а гэта вядзе да змяншэння вярчальнага моманту рухавіка. Каб вярчальны момант рухавіка ўзрастаў і рухавік набраў абароты, неабходна зменшыць супраціўленне пускавога рэастата. Пры гэтым рухавік дасягае намінальнай частаты вярчэння і рэастат поўнасцю выводзіцца.



Рыс. 6.12. Схема пуску ў ход асінхроннага рухавіка з фазным ротарам з дапамогай пускавога рэастата

Механічныя характарыстыкі пуску асінхроннага рухавіка з дапамогай пускавога рэастата паказаны на рыс. 6.13. Пуск рухавіка пачынаецца з пункта *1* з процідзейным момантам $M_п$ і адбываецца па ніжняй характарыстыцы *1—2*. Як толькі рухавік набярэ абароты (пункт *2*), змяншаюць супраціўленне рэастата і рухавік пераходзіць на другую характарыстыку ў пункт *3*. Пасля гэтага частата вярчэння рухавіка павялічваецца па характарыстыцы *3—4*. Далей зноў змяншаецца супраціўленне рэастата, частата вярчэння рухавіка пераходзіць на характарыстыку *5—6* пры поўным вывадзе пускавога рэастата і рухавік набывае намінальную частату вярчэння пры пэўнай нагрузцы з процідзейным момантам *M*.

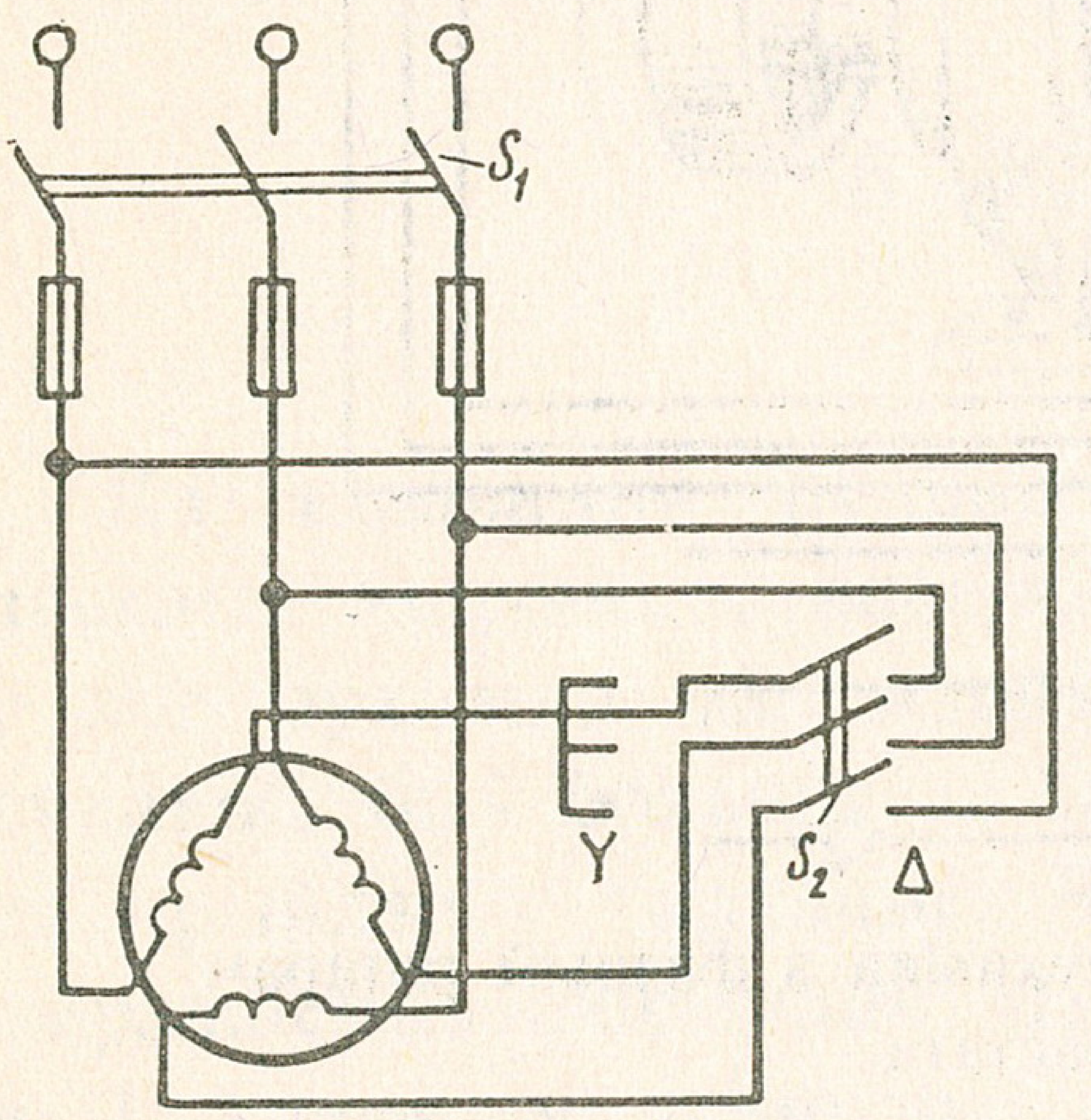
У дадзеным выпадку разгледжаны пускавы рэастат з дзвюма секцыямі. Звычайна на практыцы прымяняюцца пускавыя рэастаты з вялікай колькасцю секцый, што забяспечвае больш плаўны пуск рухавіка ў ход. Разгледжаны спосаб пуску рухавіка з фазным ротарам не прымяняецца для пуску асінхроннага рухавіка з каратказамкнутым ротарам па прычыне самой канструкцыі ротара.



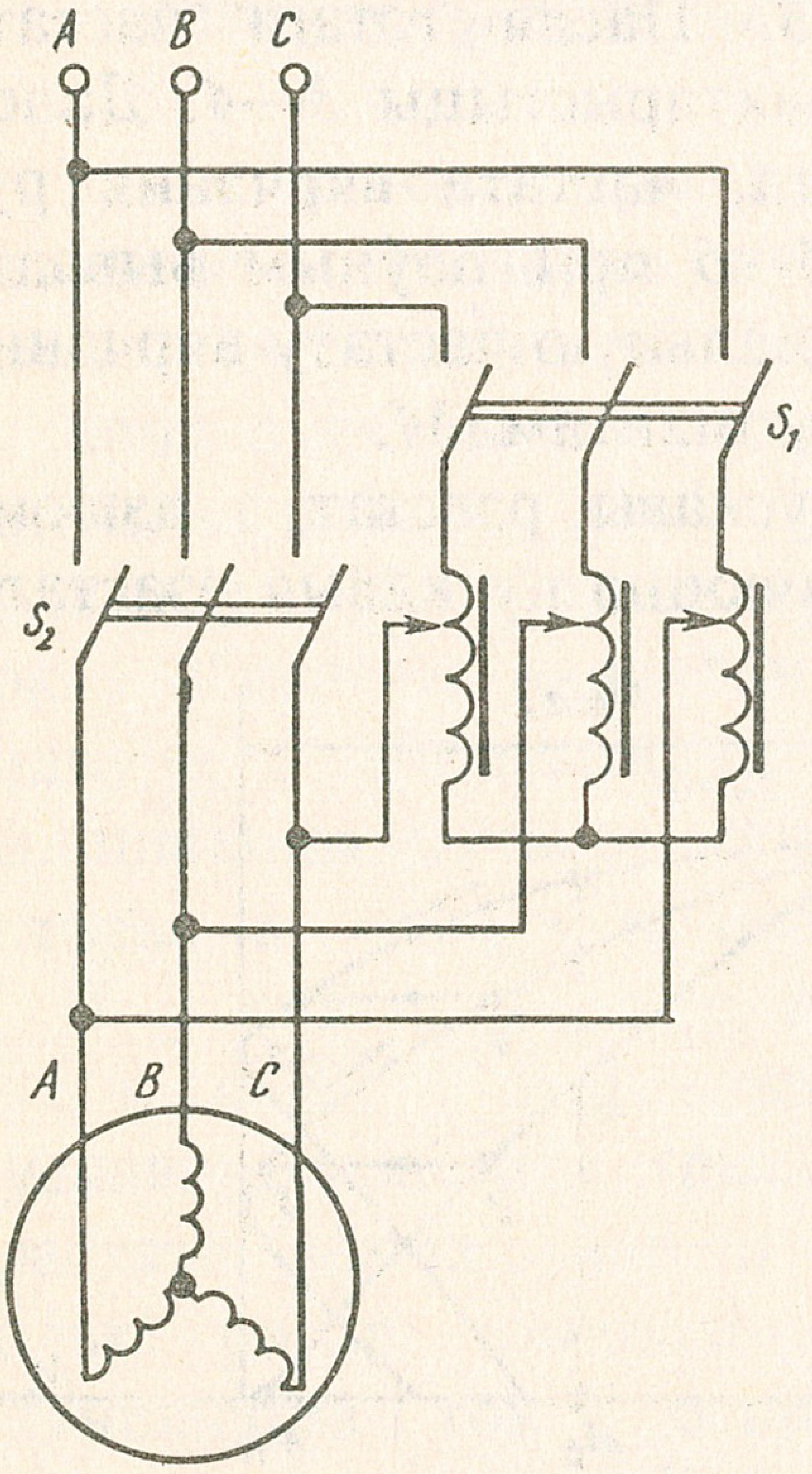
Рыс. 6.13. Механічная характарыстыка пуска асінхроннага рухавіка з фазным ротарам пры дапамозе пускавога рэастата

П у с к у х о д а с і н х р о н н ы х р у х а в і к о ў з к а р о т к а з а м к н у т ы м р о т а р а м ажыццяўляецца непасрэдным уключэннем у сетку. Для змяншэння

пускавога току ў момант пуску абмоткі статара трохфазнага асінхроннага рухавіка на некалькі секунд злучаюцца зоркай. Пасля таго як ротар рухавіка раскруціцца, абмоткі статара пераключаюцца з зоркі на трохвугольнік (рыс. 6.14), значыць падключаюцца да лінейнага напружання.



Рыс. 6.14. Схема пуску асінхроннага рухавіка шляхам пераключэння з зоркі на трохвугольнік



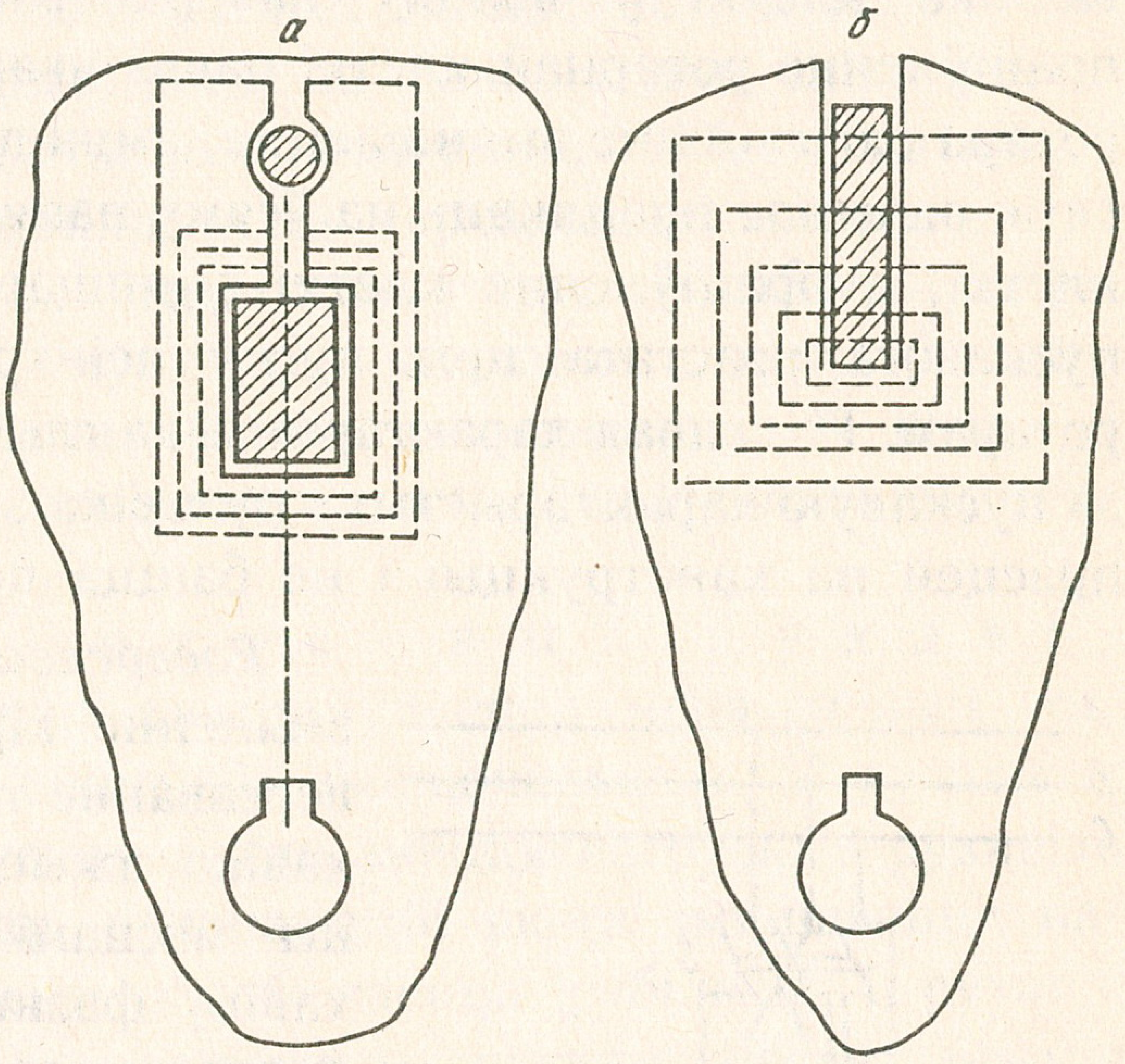
Рыс. 6.15. Схема аўтатрансфарматарнага пуску асінхроннага рухавіка

Пуск асінхроннага рухавіка з пераключэннем з зоркі на трохвугольнік можа прымяняцца ў тым выпадку, калі пры пуску рухавіка яго нагрузка не перавышае 40 % намінальнай. Пры большай нагрузцы рухавік не прыйдзе ў вярчэнне. Акрамя таго, пуск асінхроннага рухавіка з падобным пераключэннем патрабуе, каб напружанне на фазнай абмотцы статара адпавядала лінейнаму напружанню сеткі. Напрыклад, на шчытку рухавіка ўказана $Y/\Delta - 380/220$ В. Гэта значыць, што калі ў сетцы лінейнае напружанне 380 В, рухавік належыць падключаць у сетку зоркай, а калі ў сетцы лінейнае напружанне 220 В, то рухавік належыць падключаць трохвугольнікам. У першым і ў другім выпадках на абмотку фазы рухавіка прыпадае напружанне 220 В. Пераключаць такі рухавік з зоркі на трохвугольнік у сетцы з лінейным напружаннем 380 В нельга, бо фазныя абмоткі трапяць пад лінейнае напружанне 380 В і рухавік можа згарэць. Для больш плаўнага пуску асінхроннага рухавіка з каротказамкнутым ротарам прымяняюцца аўтатрансфарматары (рыс. 6.15). У момант пуску ўключаюць рубільнік S_1 і паступова павялічваюць напружанне на рухавіку. Пасля таго як ротар раскруціцца, праз аўтатрансфарматар падаюць на рухавік поўнае напружанне сеткі і ўключаюць рубільнік S_2.

Рэактарны спосаб пуску асінхроннага рухавіка з каротказамкнутым ротарам заключаецца ў тым, што замест

аўтатрансфарматара падключаецца пускавы рэактар, які ўяўляе сабой рэактыўнае супраціўленне.

Для паляпшэння пускавых характарыстык асінхронныя кароткаказамкнутыя рухавікі вырабляюцца дзвюх канструкцый: двухклетачныя і глыбокапазныя. У двухклетачных рухавіках ротар мае дзве кароткаказамкнутыя клеткі, якія размешчаны ў пазах стрыжня адна над другой (рыс. 6.16, *а*).



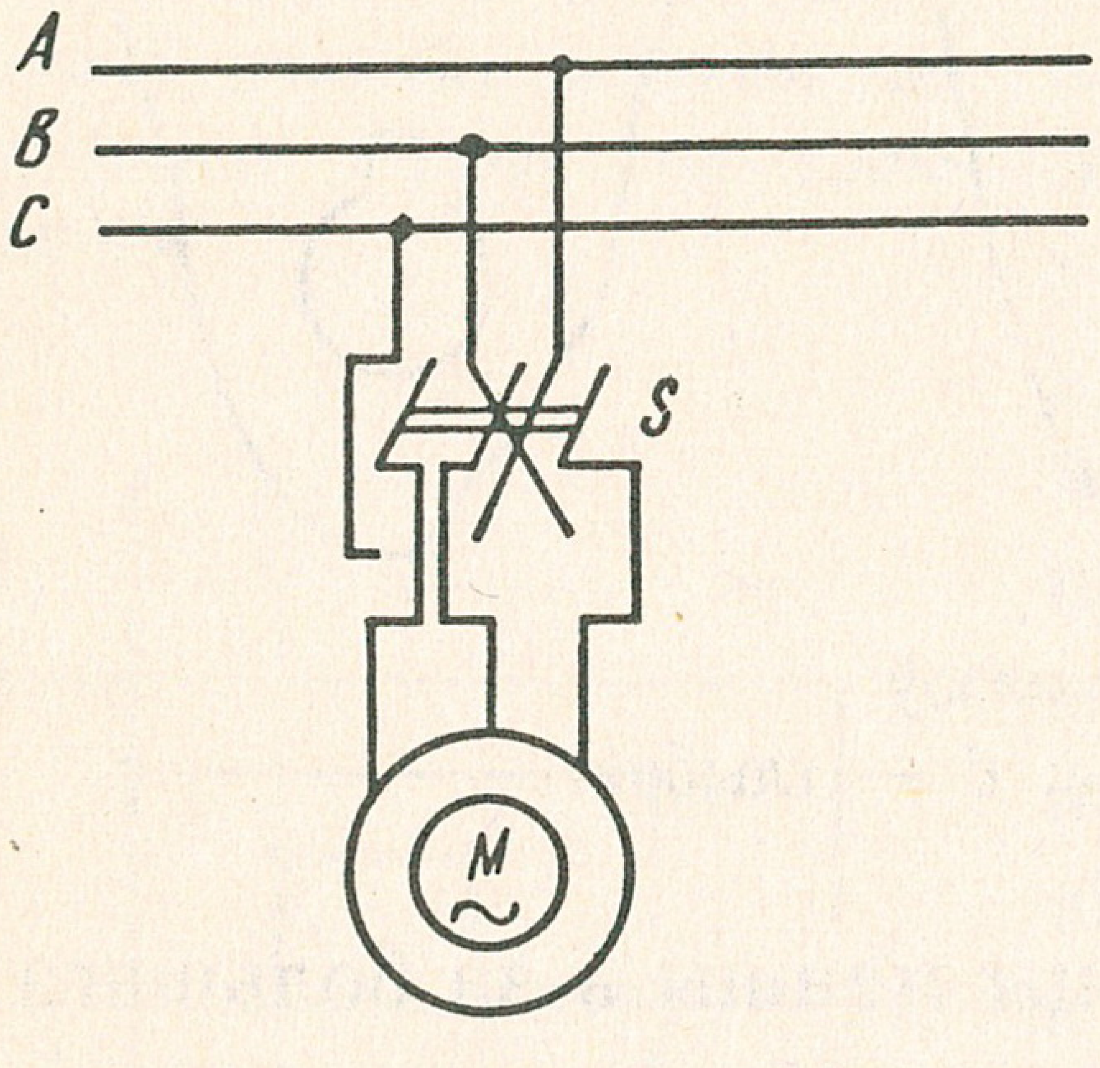
Рыс. 6.16. Форма пазоў:
а — двухклетачны; *б* — глыбокі

Верхняя кароткаказамкнутая клетка вырабляецца з матэрыялу з большым удзельным супраціўленнем (латунь, бронза) і называецца *пускавой*, а ніжняя — з медных праваднікоў вялікага сячэння і называецца *рабочай.* Пускавая клетка мае большае актыўнае супраціўленне ў параўнанні з рабочай, а рабочая клетка мае большае індуктыўнае супраціўленне, бо ў ёй узбуджаецца большая ЭРС самаіндукцыі, выкліканая магнітным патокам рассеяння. Магнітны паток рассеяння ў верхняй (пускавой) клетцы меншы з-за большага магнітнага супраціўлення ў верхніх частках ротара над пазамі.

Пры пуску рухавіка (s = 1) частата току ў клетках ротара будзе найбольшая і роўная частаце току ў сетцы. У рабочай клетцы, якая валодае вялікім індуктыўным супраціўленнем, будзе працякаць невялікі пускавы ток. У верхняй (пускавой) клетцы будзе працякаць пускавы ток, які забяспечвае неабходны вярчальны момант рухавіка. Актыўнае супраціўленне пускавой клеткі, аналагічнае пускавому рэастату ў рухавіках з фазным ротарам, паляпшае пускавую характарыстыку рухавіка. Калі ротар прыйдзе ў вярчэнне, частата току ў клетках зменшыцца, зменшыцца і індуктыўнае супраціўленне рабочай клеткі, а ток у ёй павялічыцца, павялічыцца і вярчальны момант рухавіка, які ўраўнаважвае тармазны момант нагрузкі.

Актыўнае супраціўленне рабочай клеткі малое, што адпавядае вываду пускавога рэастата пры пуску рухавіка з фазным ротарам. Прамысловасцю вырабляюцца кароткаказамкнутыя ротары з двайной алюмініевай клеткай. Выраб ротараў з двайной алюмініевай клеткай

прасцейшы і дзешавейшы, але пускавыя ўласцівасці рухавіка некалькі горшыя. На практыцы шырока прымяняюцца асінхронныя рухавікі з глыбокімі пазамі (рыс. 6.16, *б*). У гэтых рухавіках ротарная клетка вырабляецца з глыбокім пазам. Глыбіня паза ротара намнога большая за яго шырыню. Праваднік клеткі звычайна медны. Пры пуску рухавіка, калі $s = 1$ і частата току ў клетцы ротара найбольшая, ток у клетцы выцясняецца ў верхнюю частку правадніка клеткі ў выніку паверхневага эфекту. Пры гэтым супраціўленне ротарнай клеткі павялічваецца. Па меры раскручвання ротара слізгаценне змяншаецца, змяншаецца частата току ў ротары і ток пачынае працякаць па ўсяму папярочнаму сячэнню правадніка клеткі, супраціўленне клеткі змяншаецца, што адпавядае вываду пускавога рэастата пры пуску асінхроннага рухавіка з фазным ротарам. Пускавая характарыстыка глыбакапазнага рухавіка горшая за пускавую характарыстыку рухавіка з двайной клеткай, але першы прасцей па канструкцыі і не баіцца перагрэву.



Рыс. 6.17. Схема рэверсавання асінхроннага рухавіка

Рэверсаваннем рухавіка называецца змяненне кірунку вярчэння ротара. Рэверсаванне трохфазнага асінхроннага рухавіка ажыццяўляецца шляхам перамены месцамі двух падключаных к рухавіку фазных правадоў. Пераключэнне фазных правадоў змяняе кірунак вярчэння магнітнага поля статара, а значыць і кірунак вярчэння ротара. Схема рэверсавання асінхроннага рухавіка з дапамогай пераключальніка паказана на рыс. 6.17. Трохфазныя асінхронныя рухавікі з кароткаамкнутым ротарам не могуць плаўна змяняць частату вярчэння. Частата вярчэння ротара звязана з частатой вярчэння магнітнага поля статара, якая выражаецца формулай (6.1).

Паколькі частата пераменнага току — велічыня пастаянная і роўная 50 Гц, то на практыцы змяненне частаты вярчэння асінхроннага рухавіка ажыццяўляецца шляхам змянення ліку пар полюсаў магнітнага поля статара. Лік пар полюсаў залежыць ад ліку паслядоўна злучаных абмотак у фазах статара. Пры шасці абмотках статара на кожную фазу прыпадае па дзве абмоткі, якія можна злучаць адна з другой паслядоўна або паралельна. Пры паслядоўным злучэнні абмотак атрымаем чатырохполюснае магнітнае поле, якое будзе вярцецца з частатой 25 аб/с. Калі злучым фазныя абмоткі паралельна, атрымаем двухполюснае магнітнае поле, якое будзе вярцецца з частатой 50 аб/с. Пры дзевяці і дванаццаці абмотках статара можна атрымаць частоты

вярчэння магнітнага поля 10,67 аб/с і 12,5 аб/с. Такім чынам, трохфазны асінхронны рухавік з каротказамкнутым ротарам мае толькі ступенчатае змяненне частаты вярчэння, што з'яўляецца вялікім недахопам рухавікоў гэтага тыпу.

Для змянення частаты вярчэння асінхроннага рухавіка з фазным ротарам прымяняецца рэгулявальны рэастат, які адрозніваецца ад пускавога тым, што мае больш секцый і ўключаецца на працяглы час. Рэгулявальны рэастат з'яўляецца трохфазным і ўключаецца паслядоўна з фазнымі абмоткамі ротара. Увядзенне рэастата змяншае ток у ротары, што прыводзіць да павелічэння слізгацення. Павелічэнне слізгацення выклікае павелічэнне ЭРС у ротары і прыводзіць да аднаўлення папярэдняга вярчальнага моманту, але пры меншай частаце вярчэння. Недахопам гэтага спосабу рэгулёўкі частаты вярчэння рухавіка з'яўляюцца цеплавыя страты ў самім рэастаце. Рэгулявальны рэастат звычайна манціруецца разам з пускавым. Гэта ўстройства называецца *пускарэгулявальным рэастатам.*

С п ы н е н н е а с і н х р о н н ы х р у х а в і к о ў невялікай магутнасці ажыццяўляецца непасрэдным выключэннем рубільніка або пакетнага выключальніка. У рухавіках з аўтатрансфарматарным пускам пасля зняцця нагрузкі з рухавіка ўводзіцца аўтатрансфарматар, з дапамогай якога змяншаецца напружанне на рухавіку. Затым выключаецца рубільнік і рухавік спыняецца. У рухавіках з рэастатным пускам пасля зняцця нагрузкі ўводзіцца рэастат, затым выключаецца рубільнік.

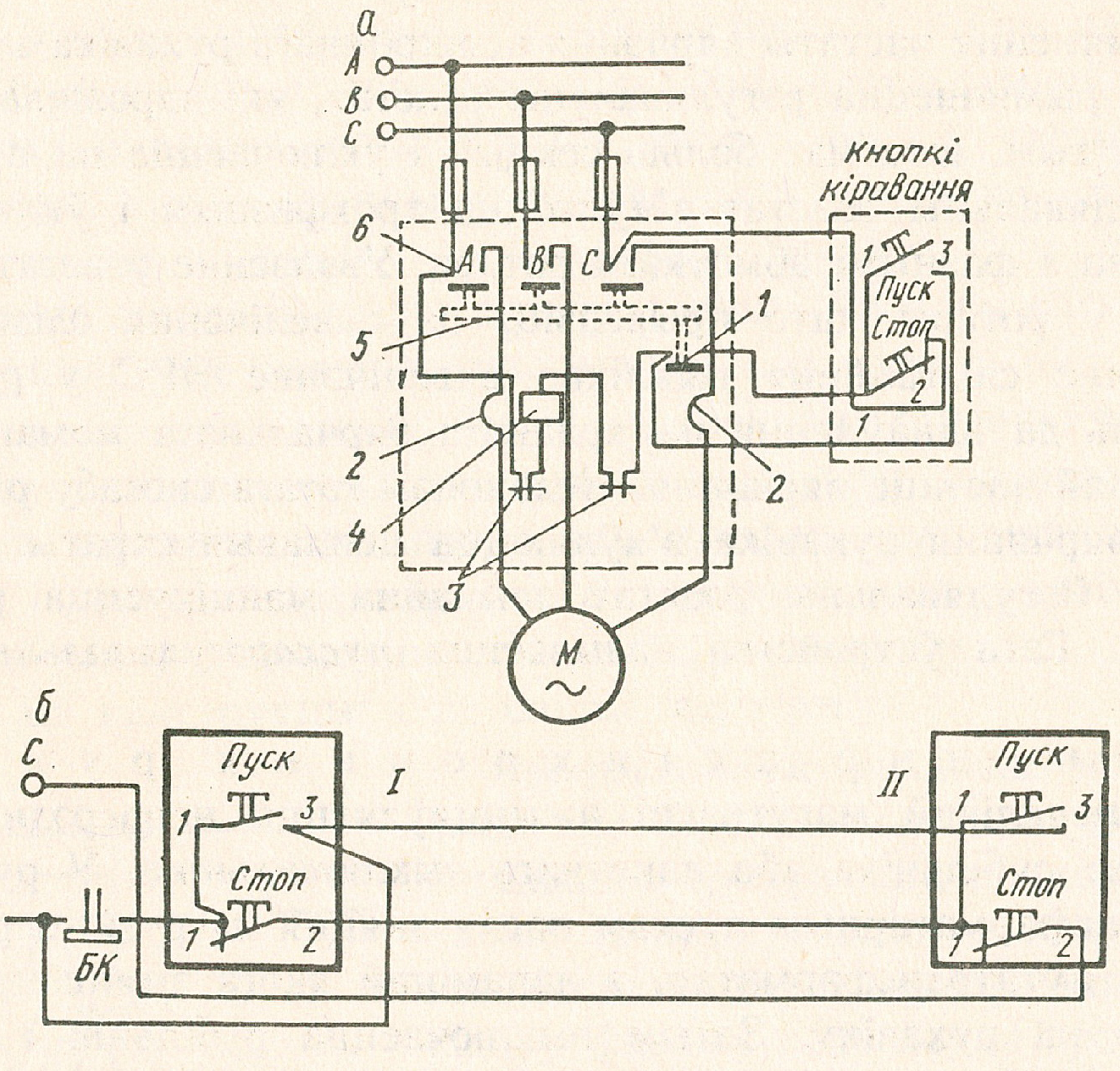
У практыцы часта патрабуецца хуткае спыненне рухавіка. У гэтым выпадку выконваецца электрычнае тармажэнне рухавіка. Электрычнае тармажэнне асінхронных рухавікоў ажыццяўляецца двума спосабамі: процiўключэннем і рэкуператыўным тармажэннем.

Для т а р м а ж э н н я п р о ц і ў к л ю ч э н н е м трэба падключэнне дзвюх фаз статара памяняць месцамі. Пры гэтым змяняецца кірунак вярчэння магнітнага поля статара і ротар тармазіцца. Пры спыненні ротара неабходна рухавік адключыць ад сеткі, таму што ротар пачне вярцецца ў зваротным кірунку.

Р э к у п е р а т ы ў н а е т а р м а ж э н н е ажыццяўляецца шляхам пераводу рухавіка ў генератарны рэжым. Для гэтага неабходна, каб частата вярчэння ротара была большая за частату вярчэння магнітнага поля.

У многаабмоткавых статарах абмоткі статара ў час тармажэння пераключаюцца з меншага ліку пар полюсаў на большы. Пры гэтым асінхронны рухавік становіцца генератарам і аддае ў сетку электрычную энергію, якая ўзнікае за кошт механічнай энергіі ротара. Для поўнага спынення рухавіка прымяняецца механічны тормаз.

Для дыстанцыйнага і аўтаматычнага кіравання пускам і спыненнем асінхронных рухавікоў з каротказамкнутым ротарам служыць магнітны пускальнік, схема якога паказана на рыс. 6.18.



Рыс. 6.18. Магнітны пускальнік:

а — схема пуску асінхроннага рухавіка з дапамогай магнітнага пускальніка; *б* — схема дыстанцыйнага незалежнага кіравання рухавіком з двух месц

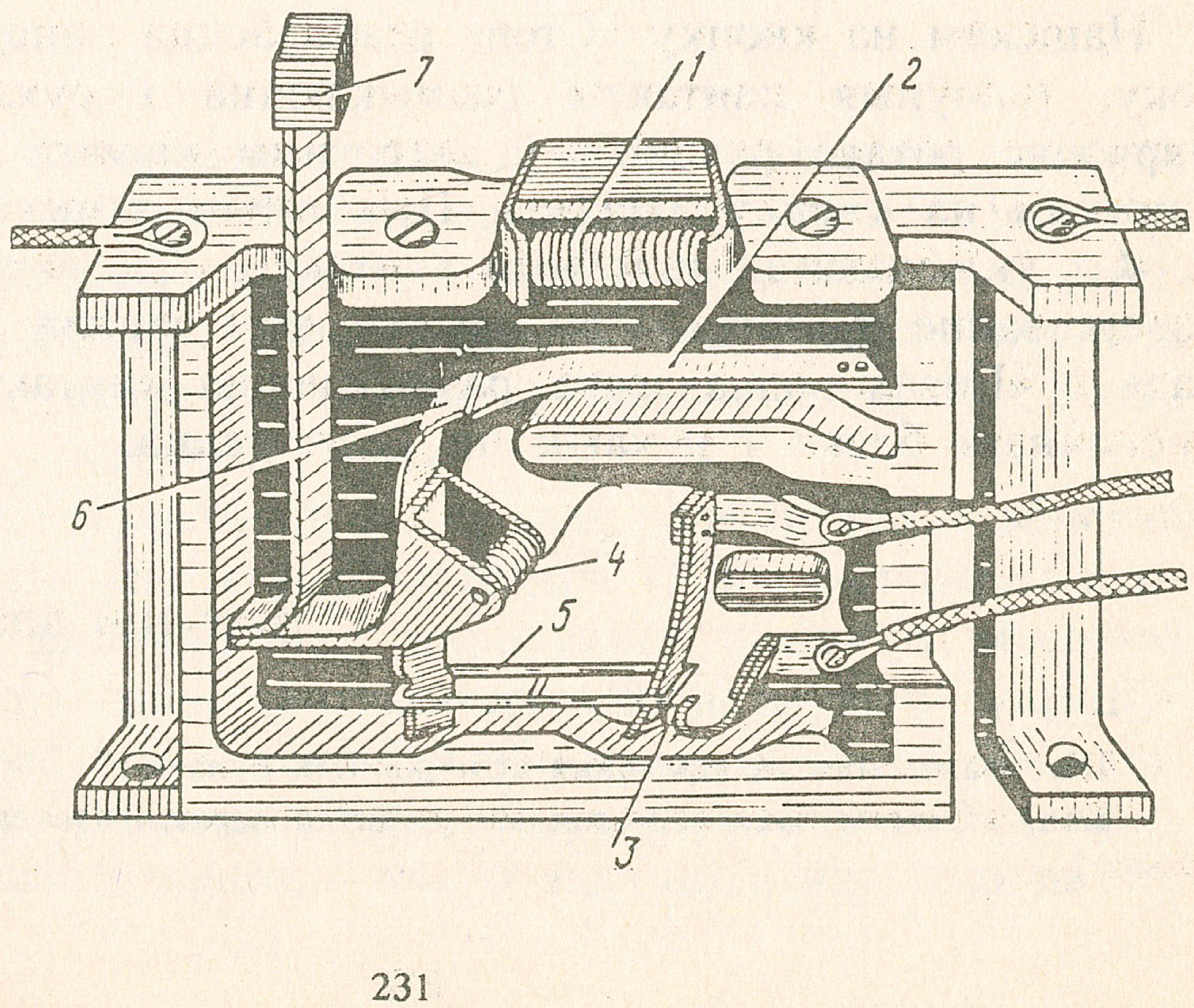
М а г н і т н ы п у с к а л ь н і к мае тры падвойныя галоўныя кантакты *6*, якія размешчаны ў дугагасільных камерах, якар з рухомымі кантактамі *5*, блок-кантакт *1*, два цеплавыя рэле *2*, электрамагніт *4*.

Пуск рухавіка магнітным пускальнікам ажыццяўляецца наступным чынам. Націскаюць на кнопку «Пуск» на блоку кнопак кіравання, пры гэтым замыкаецца ланцуг aпeратыўнага току ад фазы *A* праз кантакты *3* цеплавых рэле, абмотку электрамагніта *4*, кантакты кнопак «Пуск» і «Стоп» да фазы *C*. Стрыжань электрамагніта ўцягваецца ў катушку электрамагніта, а якар з рухомымі кантактамі *5* замкне галоўныя кантакты *6* і блок-кантакт *1*. Замыканне галоўных кантактаў забяспечвае падключэнне рухавіка ў сетку, а блок-кантактаў — замыканне ланцуга аператыўнага току. У гэтым выпадку аператыўны ток ад фазы *A* пойдзе праз кантакты *3* цеплавога рэле, абмотку электрамагніта *4*, блок-кантакт *1*, кантакт кнопкі «Стоп» і да фазы *C*. Спыненне

рухавіка робяць кнопкай «Стоп», разрываюць ланцуг кіравання. Для дыстанцыйнага кіравання асінхронным рухавіком з дапамогай магнітнага пускальніка прымяняюцца два блокі кнопак кіравання. Адзін блок кнопак устанаўліваецца побач з магнітным пускальнікам, а другі — на дыстанцыі ў любым другім месцы. Для незалежнага кіравання рухавіком з двух месц кнопкі «Пуск» абодвух кнопачных блокаў злучаюцца паралельна, а кнопкі «Стоп» — паслядоўна, значыць клемы *3* у абодвух кнопачных блоках злучаюцца паміж сабой, а клема *2* блока, які падключаны да пускальніка, з клемай *1* дыстанцыйнага блока (рыс. 6.18, *б*). Для аховы рухавіка ад перагрузкі магнітны пускальнік забяспечваецца двума цеплавымі рэле.

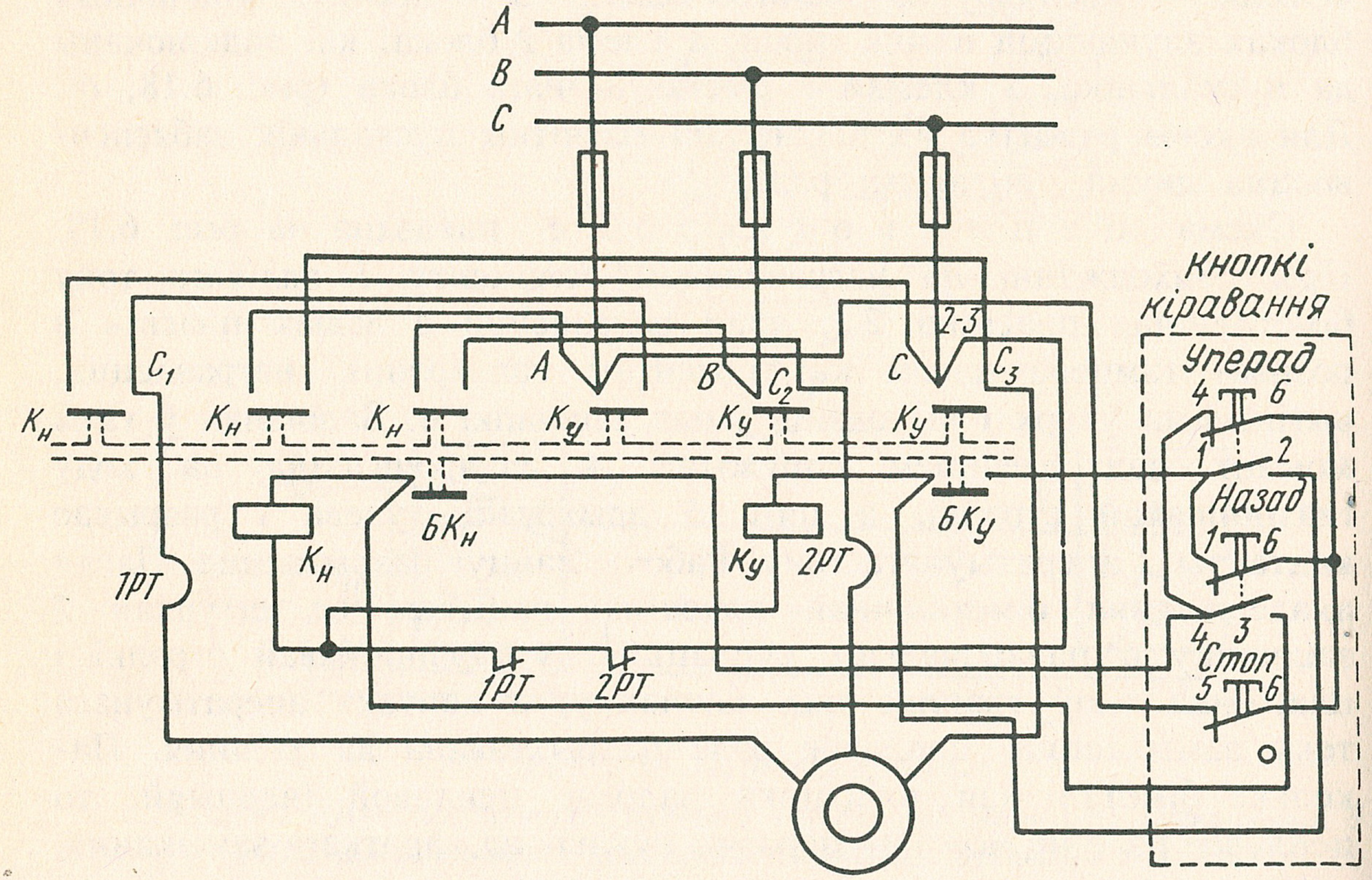
Схема ц е п л а в о г а р э л е паказана на рыс. 6.19. Пры праходжанні па награвальнаму элементу *1* вялікага току біметалічная пласціна *2* , якая складаецца з дзвюх пласцін з розным тэмпературным каэфіцыентам пашырэння, награваецца, выгінаецца ўверх і выходзіць з-пад зашчапкі *6*. Зашчапка ў гэты момант пад дзеяннем спружыны *4* паварочваецца па ходу гадзіннікавай стрэлкі, а цяга *5* адыходзіць улева і разрывае кантакты *3* аператыўнага току. Рабочы ланцуг разрываецца. Пасля ахалоджвання біметалічнай пласцінкі націскам на штурхач *7* зашчапку *6* паварочваюць супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі і пласцінка зноў трапляе пад зашчапку, а кантакт аператыўнага току замыкаецца, цеплавое рэле падрыхтавана да дзеяння. Паколькі біметалічная пласцінка валодае цеплавой інерцыяй, то цеплавое рэле не можа засцерагчы рухавік ад кароткага замыкання.

Рэверсіўны магнітны пускальнік забяспечвае рэверсаванне асінхроннага рухавіка. Схема пуску сінхроннага рухавіка з да-



Рыс. 6.19. Схема цеплавога рэле

памогай рэверсіўнага магнітнага пускальніка паказана на рыс. 6.20. Пры націску на кнопку «Уперад» замыкаюцца кантакты *1*, *2* і апаратыўны ток пераходзіць ад фазнага проваду *A* па ланцугу: кнопка «Стоп» — замкнутыя кантакты «Назад» — абмотка электрамагніта кантактара $К_{у}$ — кантакты цеплавога рэле *РТ* — трэці фазны провад *C*. Пры гэтым замыкаюцца галоўныя кантакты $К_{у}$ і рухавік прыходзіць у рух.



Рыс. 6.20. Схема пуску асінхроннага рухавіка з дапамогай рэверсіўнага магнітнага пускальніка

Націскам на кнопку «Стоп» разрываецца ланцуг апаратыўнага току, галоўныя кантакты размыкаюцца і рухавік спыняецца. Вярчэнне ротара рухавіка ў зваротным кірунку ажыццяўляецца націскам на кнопку «Назад». Пры гэтым замыкаюцца кантакты *3*, *4* і ўключаюцца галоўныя кантакты $К_{н}$, якія забяспечваюць рэверсаванне рухавіка. Пры адначасовым націску на кнопкі «Уперад» і «Назад» адначасова размыкаюцца кантакты *4*, *6* і *1*, *6* кнопачнага блока і рухавік не ўключаецца.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што належыць да кіравання асінхроннага рухавіка?
2. Калі магчымы пуск асінхроннага рухавіка пераключэннем з зоркі на трохвугольнік?

3. У чым сутнасць аўтатрансфарматарнага пуску асінхроннага рухавіка?

4. Што называецца рэверсаваннем рухавікоў і як яго ажыццяўляюць?

5. Як будзе працаваць рухавік, у пашпарце якога адзначана Y/Δ — 380/220, калі ўключаюць яго ў сетку з лінейным напружаннем $U_л$ = 380 В трохвугольнікам, а ў сетку з лінейным напружаннем $U_л$ = 220 В — зоркай?

6. Як можна змяняць частату вярчэння ротара ў асінхронных рухавіках з каротказамкнутым ротарам?

7. У чым сутнасць паляпшэння пускавых уласцівасцей у асінхронных рухавіках з падвойнай клеткай?

8. У чым розніца пускавых уласцівасцей рухавікоў з падвоенай клеткай і рухавікоў з паглыбленымі пазамі?

9. Як растлумачыць плаўны пуск асінхроннага рухавіка з фазным ротарам з дапамогай пускавога рэастата?

10. Як рэгулюецца частата вярчэння ротара ў асінхронных рухавіках з фазным ротарам?

11. У чым сутнасць тармажэння асінхроннага рухавіка проціўключэннем?

12. У чым сутнасць рэкуператыўнага спосабу тармажэння асінхроннага рухавіка?

13. Для чаго служыць блок-кантакт у магнітным пускальніку?

14. Як ажыццяўляецца незалежнае кіраванне магнітным пускальнікам асінхроннага рухавіка з двух месц?

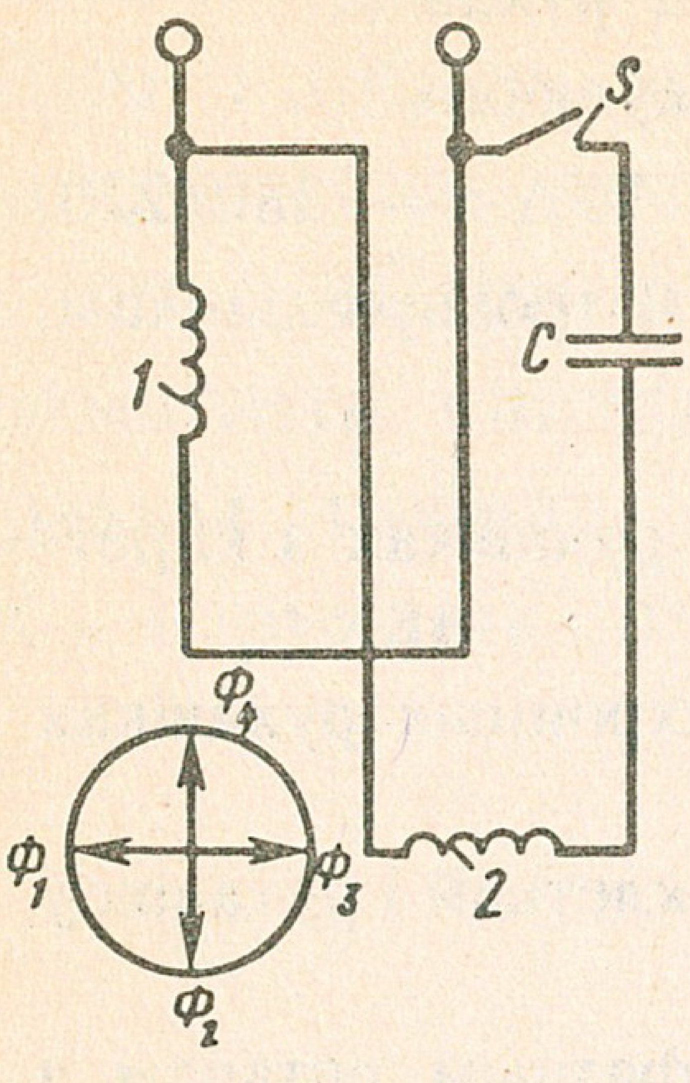
15. Для чаго служыць цеплавое рэле ў магнітным пускальніку і як яно дзейнічае?

16. Як дзейнічае рэверсіўны магнітны пускальнік?

6.7. Аднафазныя асінхронныя рухавікі

Цяпер шырока прымяняюцца аднафазныя асінхронныя рухавікі, якія з'яўляюцца асноўнымі ў сетцы аднафазнага пераменнага току. Статар такога рухавіка мае дзве абмоткі — рабочую і пускавую, або дапаможную. Абедзве абмоткі размешчаны ў пазах стрыжня так, што іх восі зрушаны ў прасторы па акружнасці на 90°. Ротар мае адну каротказамкнутую абмотку.

Для атрымання вярчальнага магнітнага поля пускавая абмотка *2* злучаецца паслядоўна з кандэнсатарам *C* або актыўным супраціўленнем і падключаецца паралельна рабочай абмотцы (рыс. 6.21). Падключэнне кандэнсатара або актыўнага супраціўлення дае зрух фаз паміж токамі ў абмотках, блізкі да 90°, што выклікае паяўленне вярчальнага магнітнага поля статара. У момант часу, калі ў пускавой абмотцы ток, а значыць і магнітны паток,



Рыс. 6.21. Схема аднафазнага асінхроннага рухавіка

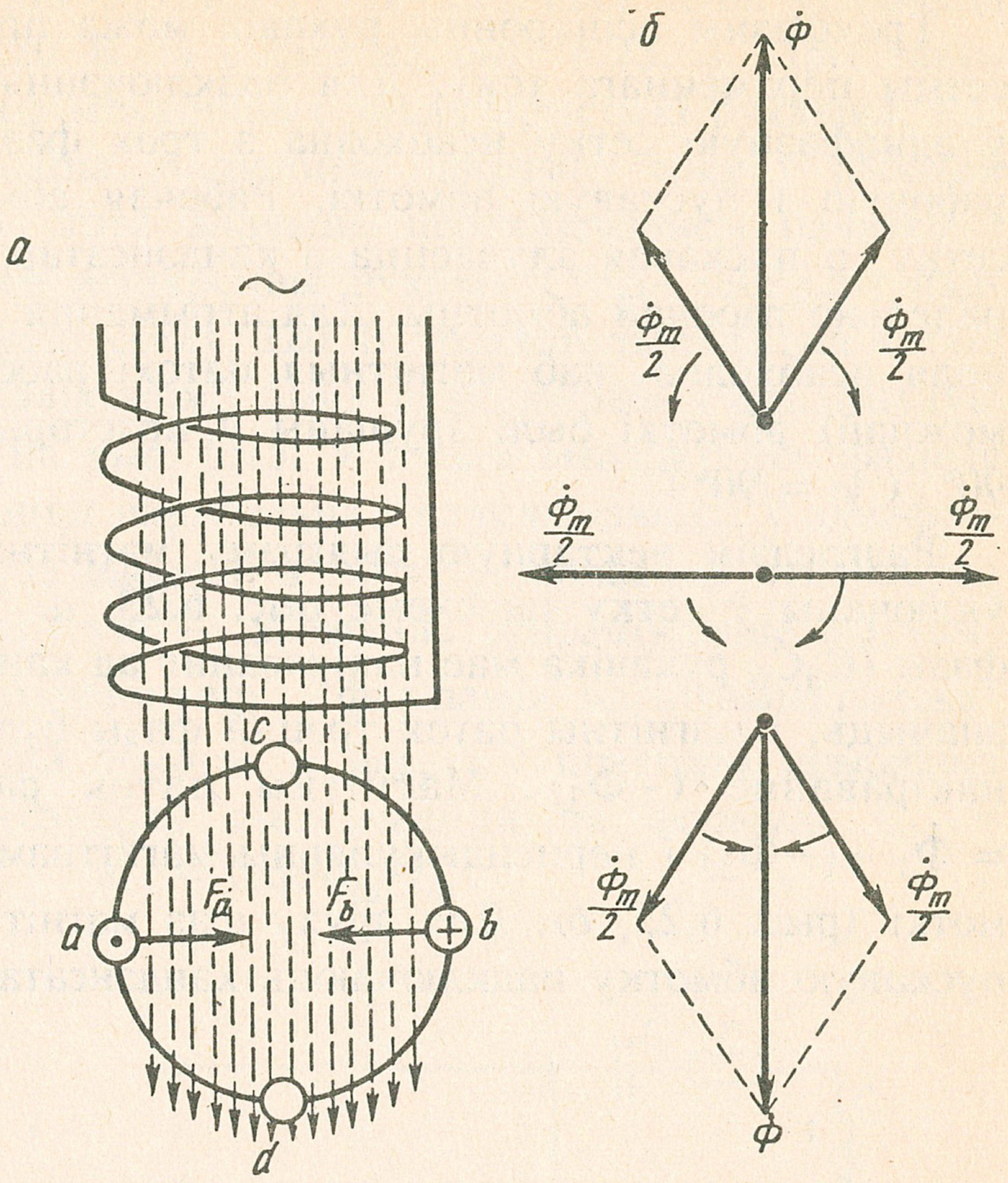
дасягнуць максімуму, у рабочай абмотцы ток (магнітны паток) роўны нулю. Сумарны магнітны паток адпавядае магнітнаму патоку $Ф_1$ (рыс. 6.21). Праз чвэрць перыяду максімум току (магнітнага патоку) будзе ў рабочай абмотцы, а ў пускавой абмотцы ток і магнітны паток у гэты момант будуць роўныя нулю. Сумарны магнітны паток адпавядае магнітнаму патоку $Ф_2$. Яшчэ праз чвэрць перыяду максімум адмоўнага току (магнітнага патоку) будзе ў пускавой абмотцы, а ў рабочай абмотцы магнітны паток, роўны нулю. Сумарны магнітны паток адпавядае магнітнаму патоку $Ф_3$ і г. д. Такім чынам, пры бесперапынным сінусоідным змяненні току ў рабочай і пускавой абмотках сумарны магнітны паток будзе вярцецца супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі. Калі амплітуды магнітных патокаў рабочай і дапаможнай абмотак роўныя, то вярчэнне магнітнага поля будзе кругавым, пры няроўнасці амплітуды — эліптычным.

Пасля пуску рухавіка абмотка з кандэнсатарам застаецца ўключанай. Рухавікі з кандэнсатарам атрымалі назву *аднафазных кандэнсатарных рухавікоў.*

У аднафазных асінхронных рухавіках малой магутнасці зрух фаз у абмотках статара забяспечваецца шляхам насадкі на частку полюса меднага кольца. У медным кольцы ўзбуджаецца індукцыйны ток, адваротны асноўнаму току абмоткі, а значыць і магнітны паток кольца процілеглы магнітнаму патоку полюса, гэта ставарае зрух фаз і парушэнне сіметрыі ў магнітным патоку і забяспечвае вярчальны момант ротара.

Пуск аднафазнага рухавіка можа ажыццяўляцца шляхам прывядзення ротара ў вярчэнне знешняй сілай. Рабочая абмотка статара, уключаная ў сетку аднафазнага пераменнага току, дае пульсуючае магнітнае поле. Пульсуючае магнітнае поле не можа прывесці ротар ў вярчэнне (рыс. 6.22, *а*). Хай магнітны паток, які паказаны на рысунку, узрастае. Тады ў вітку *cd*, размешчаным у вертыкальнай плоскасці, ЭРС індукцыі будзе роўная нулю, а ў вітку *ab*, які размешчаны ў гарызантальнай плоскасці, будуць максімальныя ЭРС індукцыі і ток. На гэтыя праваднікі дзейнічаюць сілы F_a і F_b, накіраваныя да восі вярчэння, яны не прыводзяць ротар у вярчэнне. Кожны праваднік правай палавіны ротара мае сіметрычны яму праваднік на левай палавіне ротара з процілеглым кірункам току. Таму сілы, якія дзейнічаюць на гэтыя праваднікі, ураўнаважваюцца.

Пульсуючае магнітнае поле можна ўявіць як два магнітныя патокі па палавіне амплітуднага значэння пульсуючага магнітнага патока $\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi}_m/2$, якія верцяцца з частатой n у процілеглыя бакі (рыс. 6.22). Абодва магнітныя патокі ствараюць роўныя па велічыні і процілеглыя па напрамку вярчальныя моманты ротара: $M_1 = M_2$. Таму ротар не можа прыйсці ў рух.



Рыс. 6.22. Магнітнае поле аднафазнага току: *а* — ротар у магнітным полі; *б* — вектарная дыяграма

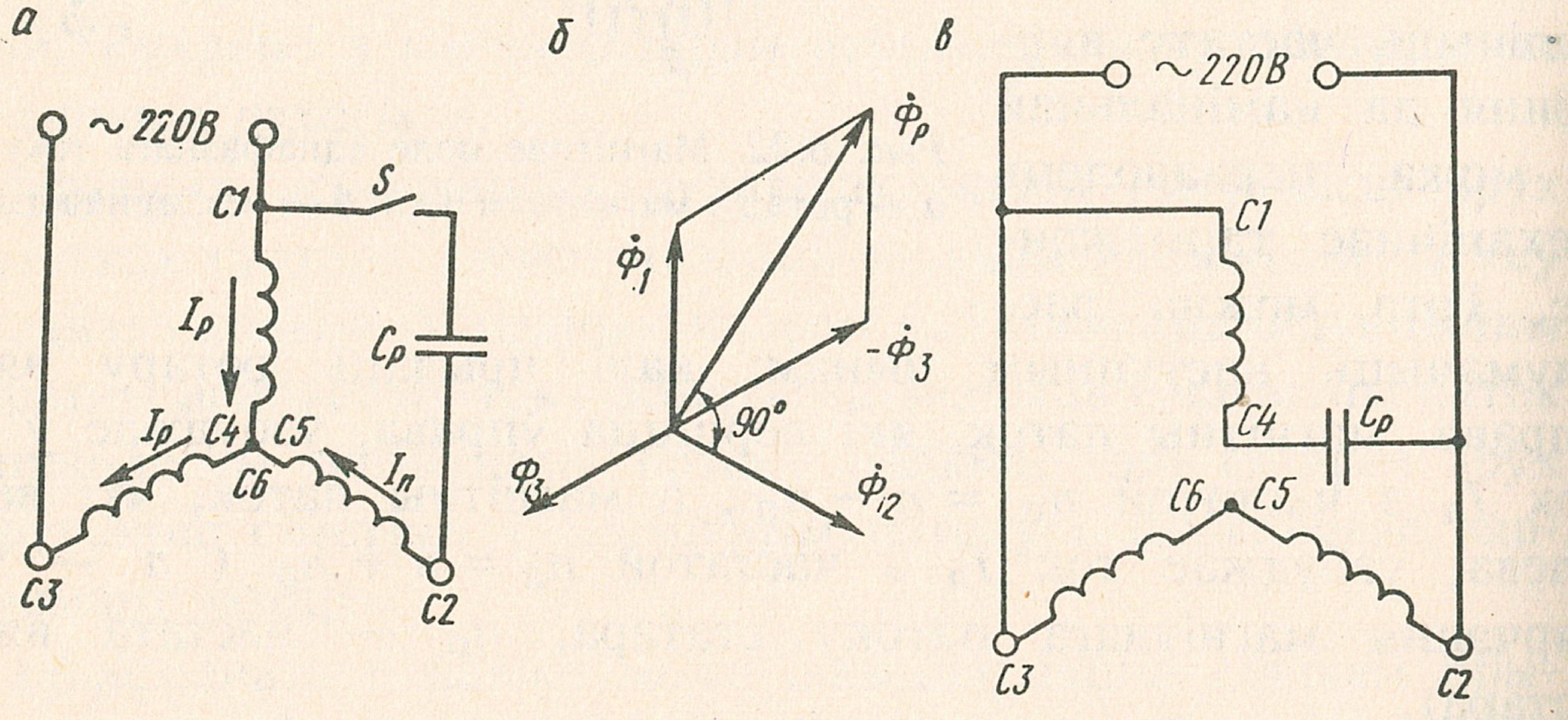
Калі ротар прывесці ў вярчэнне знешняй сілай, ён сам павялічыць частату вярчэння да намінальнай і можа пераадолець механічнае тармажэнне. Гэта можна растлумачыць наступным чынам: калі прыдаць ротару вярчэнне ўправа, магнітны паток, які верціцца ўправа, узбуджае ў ротары ток $I_п$ з частатой $n_п = n - n_р$, а магнітны паток, які верціцца ўлева, узбуджае ток $I_л$ з частатой $n_л = n + n_р$ (n — частата вярчэння магнітнага патоку статара, $n_р$ — частата вярчэння ротара).

Паколькі частата току $I_л$ значна большая за частату току $I_п$, то ротар току $I_л$ ўяўляе вялікае рэактыўнае супраціўленне X_L, узнікае вялікі зрух фаз $\psi_л$ паміж токам $I_л$ і ЭРС у ротары. Таму вярчальны момант улева меншы за вярчальны момант управа, і ротар будзе вярцецца ўправа. Калі прыдаць пачатковае вярчэнне ротару ўлева, ротар потым сам будзе працягваць вярчэнне ўлева. У трохфазных рухавіках пры адключэнні на хаду адной фазы ротар не спыняецца, а працягвае вярцецца, калі нагрузка менш за 70 % намінальнай, пры большай нагрузцы рухавік спыняецца і можа згарэць абмотка статара.

Аднафазныя асінхронныя рухавікі ў параўнанні з трохфазнымі такіх размераў маюць меншую магутнасць, горшыя пускавыя якасці, больш нізкі ККД і меншы каэфіцыент магутнасці.

Трохфазны асінхронны рухавік можа працаваць у аднафазнай сетцы пераменнага току. Для падключэння трохфазнага рухавіка ў аднафазную сетку неабходна з трох фазных абмотак стварыць рабочую і пускавую абмоткі. Рабочая абмотка падключаецца ў сетку, а пускавая злучаецца з кандэнсатарам і падключаецца паралельна рабочай абмотцы. Для атрымання вярчальнага магнітнага поля неабходна, каб магнітныя патокі рабочай і пускавой (дапаможнай) абмоткі былі зрушаны ў прасторы на 90° і па фазе на 90° ($\varphi = 90°$).

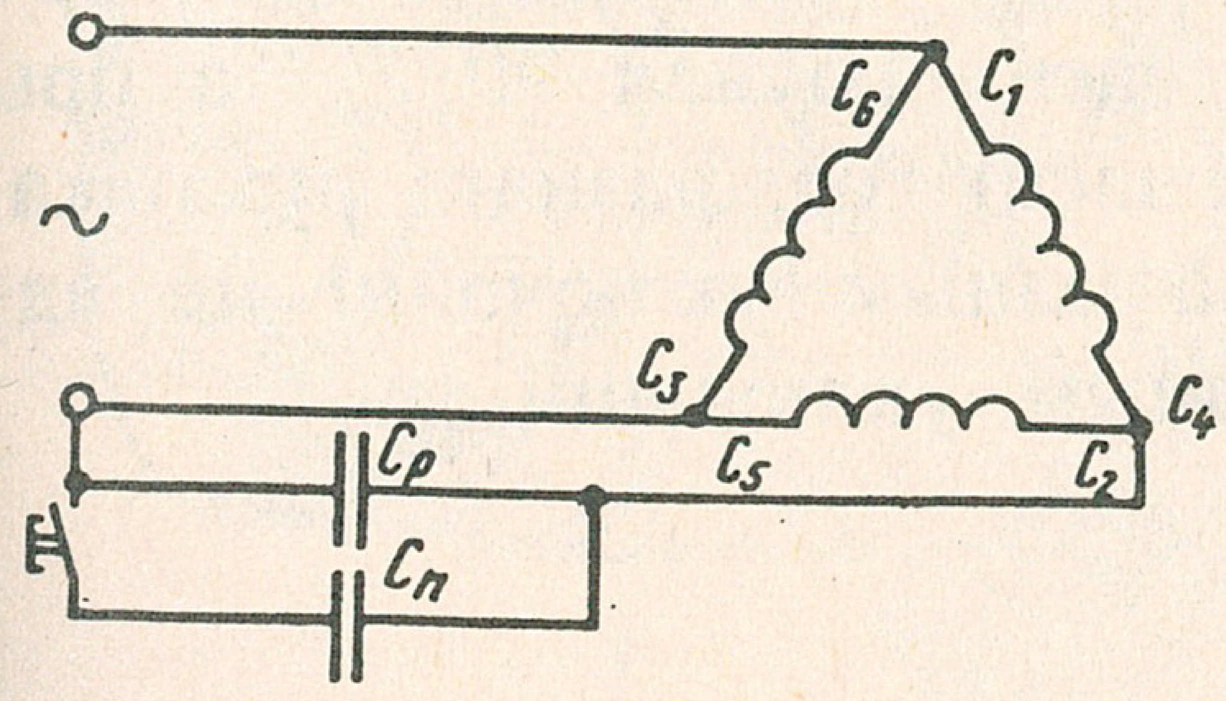
Разгледзім вектарную дыяграму магнітнага поля рухавіка, які ўключаны ў сетку па схеме рыс. 6.23, *а*. Ток у абмотцы трэцяй фазы (C_3C_6 рухавіка мае накіраванне ад канца да пачатку абмоткі, значыць, і магнітны паток трэцяй фазы будзе мець супрацьлеглае накіраванне $(-\dot{\Phi}_3)$. Магнітны паток рабочай абмоткі $\dot{\Phi}_р = \dot{\Phi}_1 + (-\dot{\Phi}_3)$ і перпендыкулярны магнітнаму патоку пускавой абмоткі (рыс. 6.23, *б*). Для зруху фаз магнітных патокаў на 90° у пускавую абмотку падключаюць кандэнсатар $C_р$.



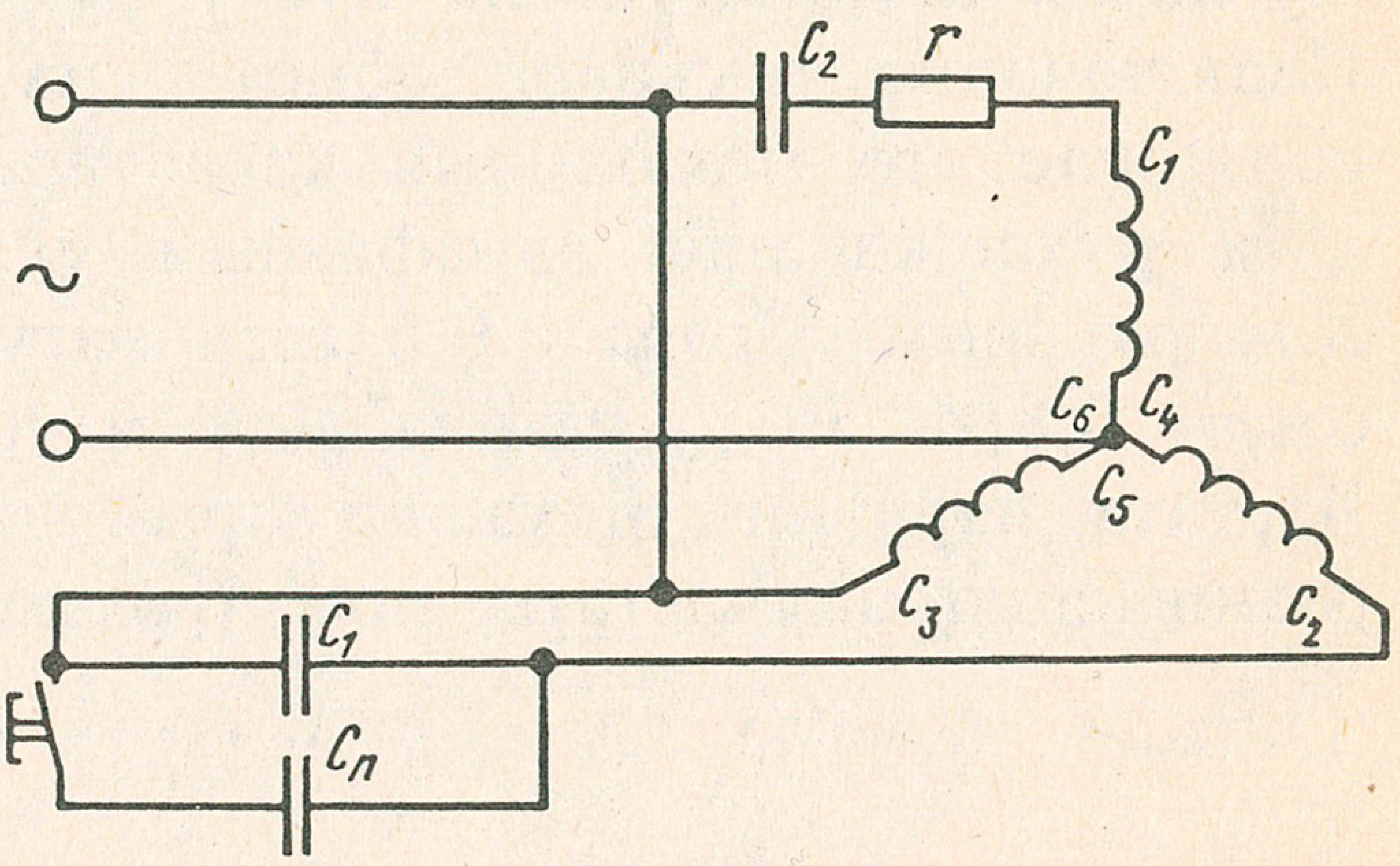
Рыс. 6.23. Схема ўключэння трохфазнага асінхроннага рухавіка Y/Δ — 220/127 у аднафазную сетку 220 В (*а, в*); вектарная дыяграма (*б*)

У залежнасці ад тэхнічных дадзеных рухавіка і напружання сеткі існуе некалькі схем уключэння трохфазнага асінхроннага рухавіка ў аднафазную сетку. Пры гэтым неабходна, каб дапушчальнае фазнае напружанне рухавіка было роўнае або блізкае да напружання сеткі. Значыць, асінхронны рухавік, у пашпарце якога ўказана Y/Δ — 220/127, уключаецца ў аднафазную сетку напружаннем 220 В зоркай, як паказана на рыс. 6.23, *а*. Пры такім уключэнні на кожную фазу рабочай абмоткі прыпадае па 110 В, а намінальнае фазнае напружанне — 127 В. Рухавік будзе працаваць.

Трохфазны асінхронны рухавік (Y/Δ–220/127) лепш уключаць у аднафазную сетку 220 В па схеме на рыс. 6.23, *в*. Пры такім уключэнні паляпшаюцца механічныя характарыстыкі рухавіка. Рэверсаванне ажыццяўляецца змяненнем напрамку току ў рабочай або пускавой абмотцы, гэта значыць пераключэннем пачатку і канца фазы. Трохфазны асінхронны рухавік (Y/Δ–380/220) падключаецца ў аднафазную сетку 220 В трохвугольнікам па схеме на рыс. 6.24. Гэты рухавік можа быць падключаны ў аднафазную сетку 220 В па схеме на рыс. 6.25. У гэтым выпадку ўсе фазныя абмоткі статара злучаюцца паралельна і падключаюцца ў аднафазную сетку. У адну з фаз рабочай абмоткі ўключаецца паслядоўна кандэнсатар C_1, а ў другую — актыўнае супраціўленне r і кандэнсатар C_2. Для забеспячэння зруху фаз паміж магнітнымі патокамі рабочай і дапаможнай абмотак у часе і ў прасторы прыблізна 90° ёмістасць кандэнсатараў вызначаецца па формуле $C_1 = 1600\ I_ф/U_ф$; $C_2 = 2C_1$, а $r = 0{,}58U_ф/I_ф$.



Рыс. 6.24. Схема падключэння трохвугольнікам трохфазнага асінхроннага рухавіка Y/Δ — 380/220 у аднафазную сетку 220 В



Рыс. 6.25. Схема падключэння зоркай трохфазнага асінхроннага рухавіка Y/Δ — 380/220 у аднафазную сетку 220 В

Для нармальнай работы трохфазнага асінхроннага рухавіка, падключанага ў аднафазную сетку, неабходна правільна падабраць ёмістасць кандэнсатараў. Пры кругавым вярчэнні магнітнага поля рэактыўная магутнасць кандэнсатара павінна быць роўнай поўнай магутнасці рухавіка $P = C\omega U^2$. З гэтай формулы $C = P\cdot 10^9/(2\pi f U^2)$, дзе P — магутнасць рухавіка, кВт; f — частата току ў сетцы, Гц; U — напружанне сеткі, В; C — ёмістасць кандэнсатара, мкФ.

Такім чынам, ёмістасць кандэнсатара прама прапарцыйная току і адваротна прапарцыйная напружанню сеткі.

На практыцы ўстаноўлены наступныя формулы вызначэння ёмістасці кандэнсатараў розных схем уключэння трохфазных асінхронных рухавікоў у адфазную сетку. Напрыклад, для схемы на рыс. 6.23, *а* $C \approx 2800 I_ф / U_ф$; для схемы на рыс. 6.23, *в* $C \approx 2740 I_ф / U_ф$; для схемы на рыс. 6.24 $C \approx 4800 I_ф / U_ф$. Груба ёмістасць кандэнсатараў можна вызначыць з разліку 5—6,5 мкФ на кожныя 100 Вт магутнасці рухавіка. Напружанне кандэнсатара павінна быць некалькі вышэйшым за напружанне сеткі. Для падключэння да асінхронных рухавікоў прымяняюцца кандэнсатары тыпаў: КБГ = МН, МБГ4, КБГ. Для пуску рухавіка пад нагрузкай неабходна паралельна рабочаму кандэнсатару падключыць пускавы кандэнсатар.

Пускавы кандэнсатар уключаецца на 2—3 с у час пуску рухавіка. Ёмістасць пускавога кандэнсатара $C_п = (1{,}5-2)C_р$. У якасці пускавых кандэнсатараў прымяняюцца электралітычныя кандэнсатары тыпу ЭП, спецыяльна прызначаныя для гэтай мэты. Пускавая абмотка пасля пуску рухавіка можа быць адключана. Падключэнне пускавой абмоткі на ўвесь час работы рухавіка паляпшае яго механічныя характарыстыкі. Магутнасць трохфазнага рухавіка пры аднафазным уключэнні залежыць ад $\cos\varphi$. Для рухавіка з $\cos\varphi = 0{,}6$ гэта магутнасць роўная 90 %, а пры $\cos\varphi = 0{,}8$ — 50 % намінальнай магутнасці трохфазнага рухавіка. Частата вярчэння рухавіка пры аднафазным уключэнні не адрозніваецца ад частаты пры трохфазным уключэнні.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

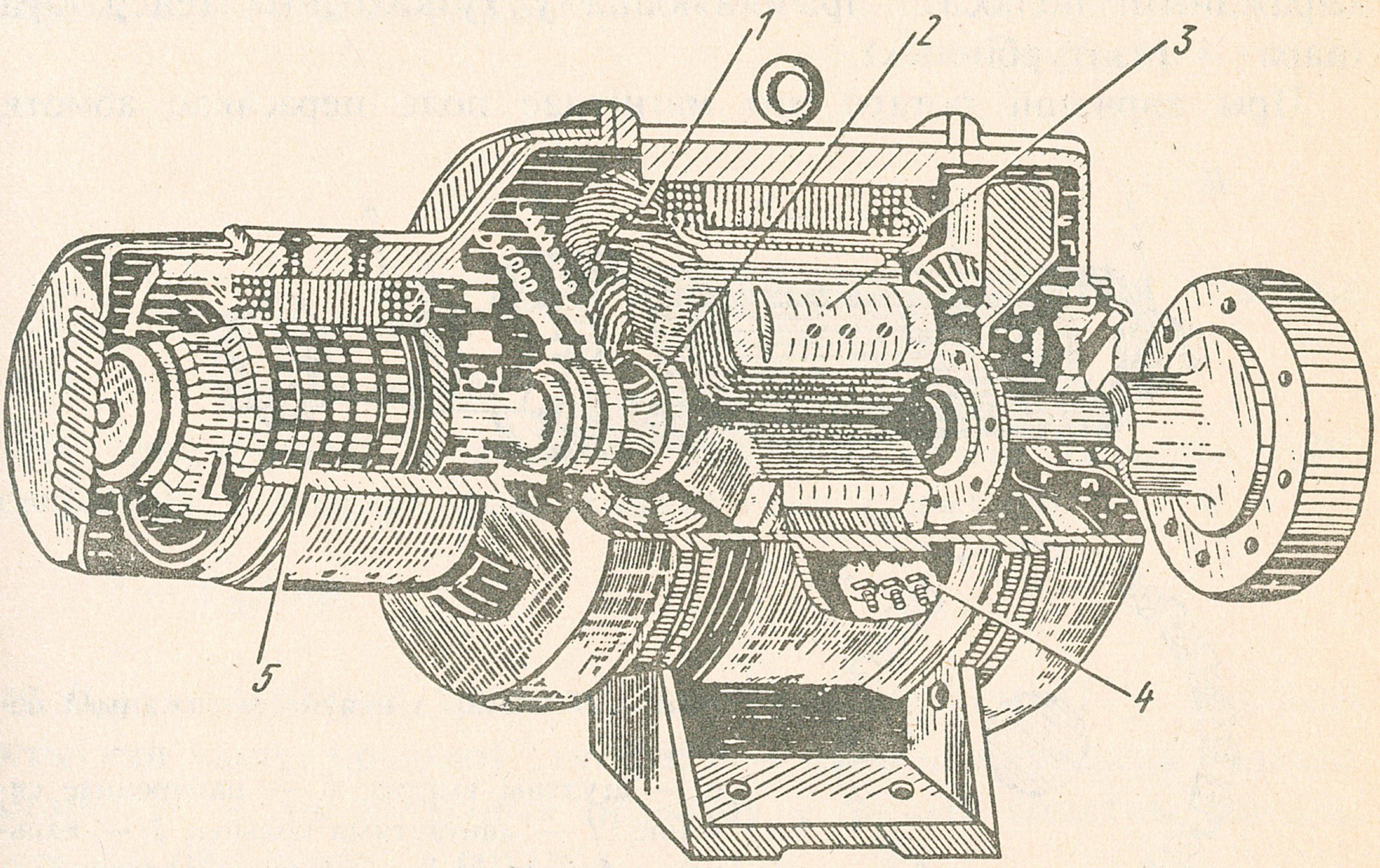
1. Як устроены аднафазны кандэнсатарны рухавік?
2. Як атрымліваецца вярчальнае магнітнае поле ў аднафазным кандэнсатарным рухавіку?
3. Якімі спосабамі можна ажыццяўляць пуск аднафазнага асінхроннага рухавіка?
4. Як ажыццяўляецца рэверсаванне трохфазнага асінхроннага рухавіка, які падключаны ў аднафазную сетку?
5. Па якой схеме належыць падключыць трохфазны асінхронны рухавік (Y/Δ–220/127) у аднафазную сетку пераменнага току з напружаннем 220 В? У сетку з напружаннем 127 В?
6. Па якой схеме належыць падключыць трохфазны асінхронны рухавік (Y/Δ–380/220) у аднафазную сетку пераменнага току з напружаннем 220 В?
7. Ці будзе працаваць трохфазны асінхронны рухавік (Y/Δ–380/220), калі яго падключыць у аднафазную сетку пераменнага току з напружаннем 220 В па схеме на рыс. 6.23?

8. Якой ёмістасці трэба ўзяць кандэнсатар для падключэння трохфазнага рухавіка, у пашпарце якога ўказана: 1 кВт, 220/380 В, 4,2—2,4 А, $\cos\varphi = 0{,}8$, у аднафазную сетку 220 В? Якая магутнасць рухавіка пры аднафазным уключэнні?

Адказ: $C = 53$ мкФ; $P = 0{,}5$ кВт.

6.8. Устройства і прынцып дзеяння трохфазнага сінхроннага генератара

Трохфазны генератар (рыс. 6.26) складаецца са статара і ротара. Стрыжань статара набіраецца з ізаляваных лістоў электратэхнічнай сталі і размешчаны ў станіне, адлітай з чыгуна або зваранай з



Рыс. 6.26. Трохфазны генератар невялікай магутнасці

лістоў сталі. У пазах стрыжня размешчана трохфазная абмотка *1*. Канцы фазных абмотак статара выводзяцца да клем, якія размешчаны на паверхні станіны ў каробцы *4*.

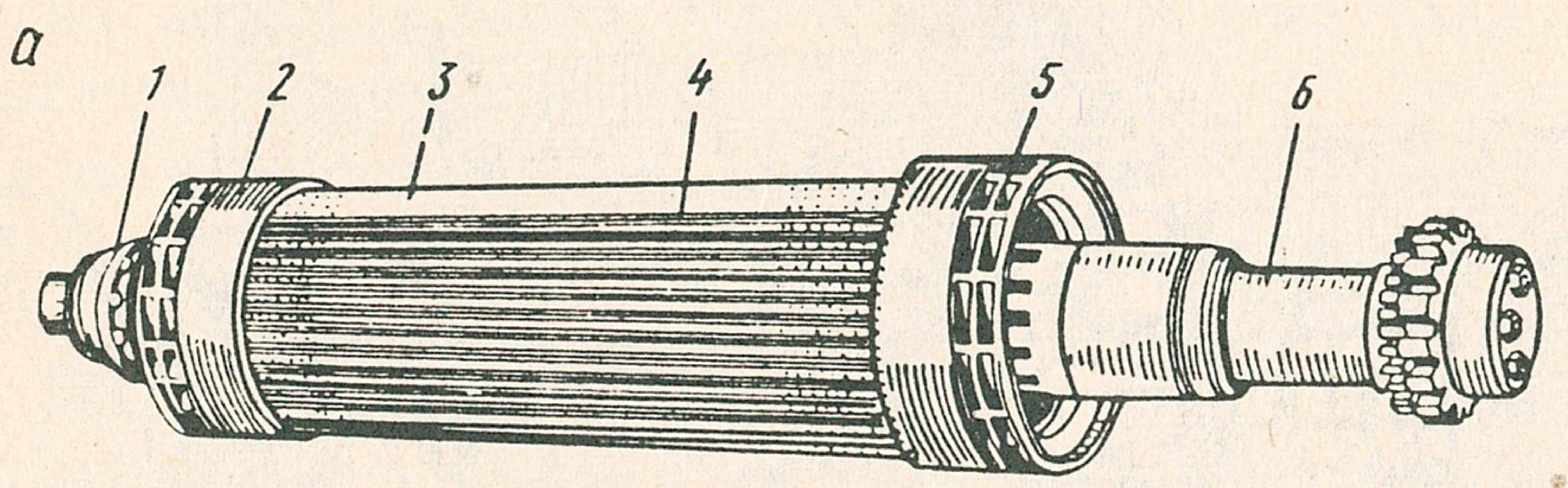
Ротар сінхроннага генератара ўяўляе сабой магутны электрамагніт *3* і служыць для стварэння магнітнага поля. Для сілкавання абмоткі электрамагніта пастаянным токам на адным валу *2* з ім размешчаны ўзбуджальнік *5* — генератар пастаяннага току.

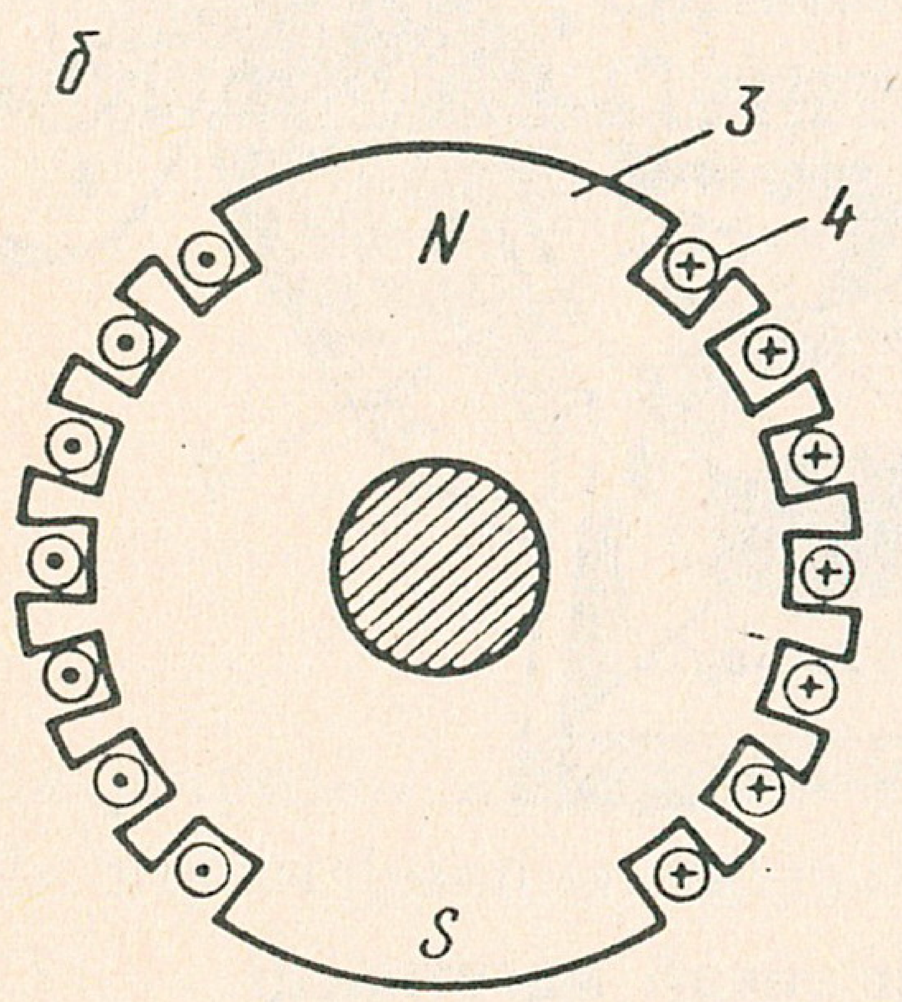
Па канструкцыі ротары сінхронных генератараў бываюць з яўна выражанымі і няяўна выражанымі полюсамі. Ротары з *я ў н а в ы р а ж а н ы м і п о л ю с а м і* прымяняюцца ў генератарах малой магутнасці і ў ціхаходных машынах (гідрагенератарах). Стрыжань такіх ротараў мае паўночныя і паўднёвыя полюсы з абмоткамі (рыс. 6.26), па якіх праходзіць пастаянны ток. Абмотка ўзбуджэння складаецца з паслядоўна злучаных абмотак кожнага полюса электрамагніта. Пачатак і канец абмоткі прыпайваюцца да двух кантактных медных кольцаў, ізаляваных адзін ад аднаго і ад вала ротара.

Кантактныя кольцы ротара з дапамогай шчотак і ізаляваных правадоў злучаюцца з калектарам узбуджальніка.

У ротарах з *н я я ў н а в ы р а ж а н ы м і п о л ю с а м і* абмотка ўкладваецца ў уздоўжныя пазы цыліндрычнага стрыжня з высакаякаснай сталі (рыс. 6.27). Ротары з няяўна выражанымі полюсамі прымяняюцца ў хуткаходных генератарах (пара- і газатурбінных).

Пры вярчэнні ротара яго магнітнае поле перасякае абмотку





Рыс. 6.27. Ротар з няяўна выражанымі полюсамі:
а — агульны выгляд; *б* — папярочнае сячэнне; *1* — кантактныя кольцы; *2* — кальцавыя бандажы; *3* — стрыжань ротара; *4* — абмотка ротара; *5* — вентылятар; *6* — вал

статара, у якой узбуджаецца пераменная ЭРС. Паколькі фазныя абмоткі статара зрушаны адна адносна другой на 120°, то і пераменныя ЭРС у іх будуць зрушаны па фазе на 120°. Пачаткі і канцы фазных абмотак выводзяцца да клем на шчытку генератара. Пачатак першай фазы абазначаецца літарай *A*, а канец — *X*; другой — *B* і *Y*; трэцяй — *C* і *Z*. Пры злучэнні статарнай абмоткі зоркай канцы фазных абмотак *X*, *Y* і *Z* злучаюцца ў адзін вузел, а пачаткі *A*, *B* і *C* падключаюцца да знешняга ланцуга (зборных шын).

У перасовачных сельскіх электрастанцыях невялікай магутнасці электрамагніт з'яўляецца статарам, а абмотка — ротарам. Канцы абмоткі прыпайваюцца да кантактных кольцаў на валу ротара. Напружанне з кольцаў адводзіцца ў знешні ланцуг пры дапамозе шчотак.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх частак складаецца сінхронны генератар? Як падзяляюцца сінхронныя генератары па канструкцыі ротара?
2. Што сабой уяўляюць ротары гідрагенератара і паратурбіннага генератара?
3. Што ўяўляе сабой статар трохфазнага генератара і для чаго ён служыць?
4. Што ўяўляе сабой узбуджальнік і для чаго ён служыць?
5. Як злучаюцца абмоткі статара трохфазнага генератара?
6. Чаму ў магутных турба- і гідрагенератарах трохфазная абмотка служыць статарам, а электрамагніт ротарам?

6.9. ЭРС генератара і рэакцыя статара

У адпаведнасці з законам электрамагнітнай індукцыі ЭРС генератара ў кожнай фазе вызначаецца формулай

$$E = B_{\text{ср}} l v w p,$$

дзе $B_{\text{ср}}$ — сярэдняе значэнне магнітнай індукцыі; l — даўжыня актыўнай часткі правадоў статара; v — адносная хуткасць полюсаў ротара; w — лік актыўных правадоў у фазнай абмотцы статара; p — лік пар полюсаў ротара.

Лінейную хуткасць v можна выразіць праз дыяметр ротара і частату вярчэння: $v = \pi D n$. Тады формула прыме выгляд

$$E = \pi B_{\text{ср}} l D w n p . \qquad (6.5)$$

Адсюль бачна, что для атрымання зададзенай велічыні ЭРС у хуткаходных генератарах за кошт вялікага ліку абаротаў неабходна зменшыць дыяметр ротара і лік пар полюсаў. Даўжыня генератара можа быць значнай. У турбагенератары ТГВ-300, які разлічаны на магутнасць $35{,}3 \cdot 10^4$ кВ·А і напружанне 20 кВ, дыяметр двухполюснага ротара 115 см, а даўжыня 1225 см.

У ціхаходных генератарах пры малой частаце вярчэння n, наадварот, можна павялічыць дыяметр ротара і лік пар полюсаў. Даўжыня генератара пры гэтым можа быць невялікай.

У гідрагенератары ВГС, які разлічаны на магутнасць $176{,}5 \cdot 10^3$ кВ·А і напружанне 15,75 кВ, пры 60-полюсным ротары ўнутраны дыяметр статара роўны 1190 см, а восевая даўжыня — 200 см. Частата ЭРС генератара залежыць ад ліку пар полюсаў ротара і частаты яго вярчэння: $f = pn$.

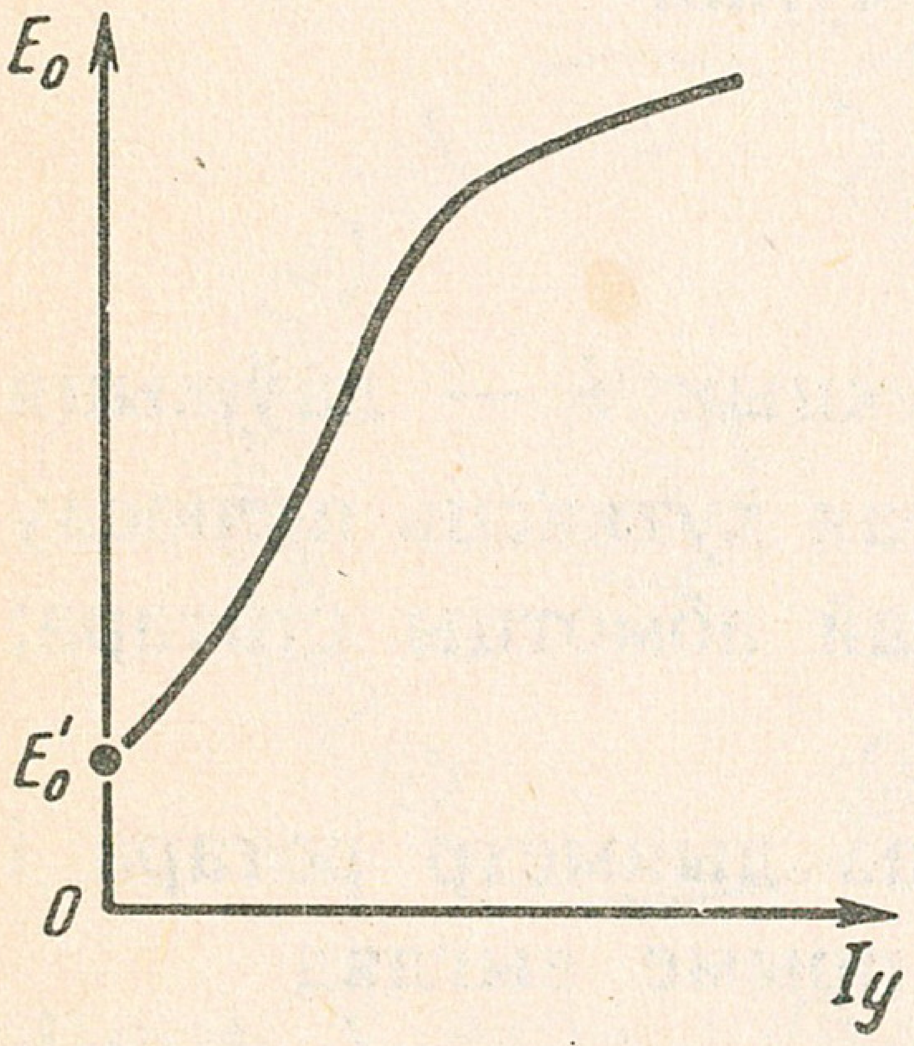
Значыць, каб забяспечыць частату пераменнага току 50 Гц турбагенератар з адной парай полюсаў павінен вярцецца з частатой 50 аб/с, а гідрагенератар з 60 полюсамі — 1,67 аб/с.

Пры пастаяннай частаце вярчэння ротара формула (6.5) прыме выгляд

$$E_0 = k\Phi_1 ,$$

дзе $k = \pi wnp$ — пастаянная велічыня; $\Phi_1 = B_{\text{ср}} lD$ — магнітны паток полюса ротара.

Значыць, ЭРС генератара пры пастаяннай частаце вярчэння ротара прапарцыйная магнітнаму патоку. Магнітны паток ротара залежыць ад току ўзбуджэння. Адсюль можна запісаць, што $E_0 = f(I_{\text{у}})$. Залежнасць ЭРС генератара ад току ўзбуджэння пры намінальнай частаце вярчэння ротара ($n = n_0$) называецца *характарыстыкай халастога ходу.* Графік характарыстыкі халастога ходу сінхроннага генератара адлюстраваны на рыс. 6.28.



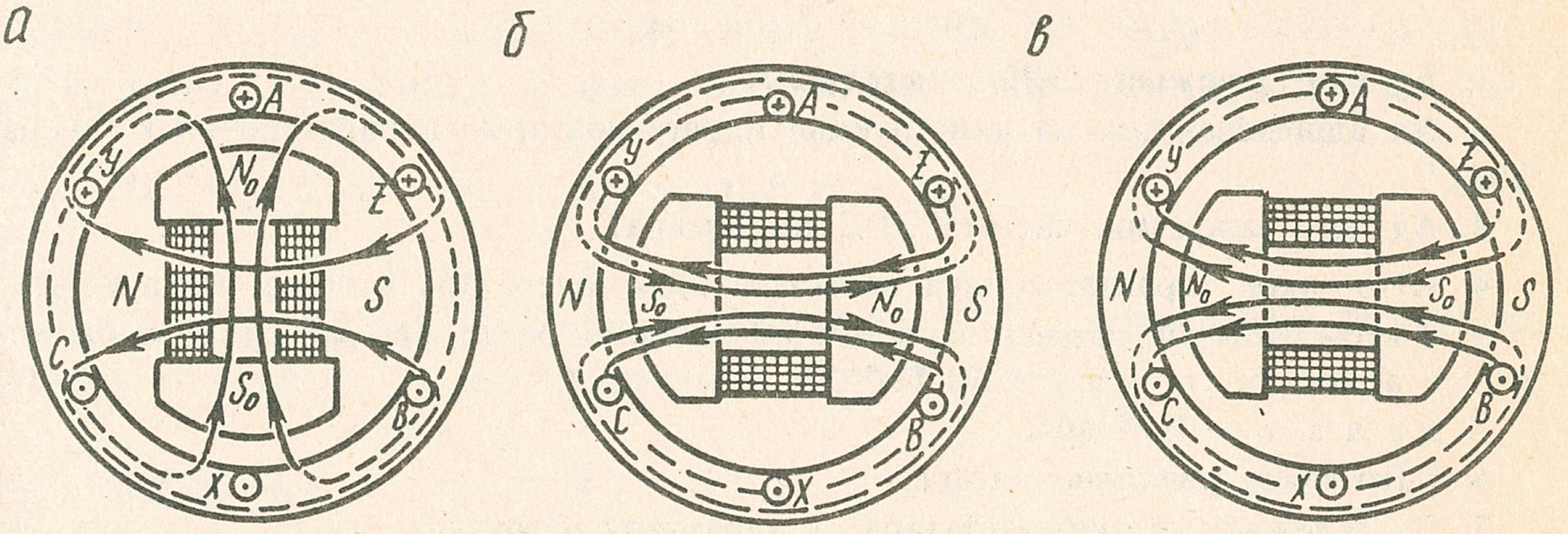
Рыс. 6.28. Характарыстыка халастога ходу сінхроннага генератара

Пры $I_{\text{у}} = 0$ ЭРС генератара E'_0 ўзбуджаецца магнітным патокам астаткавага намагнічвання ротара. Павелічэнне току ўзбуджэння вядзе да павелічэння магнітнага патоку і росту ЭРС генератара, пакуль ротар не дасягне магнітнага насычэння. Пры магнітным насычэнні ротара інтэнсіўны рост магнітнага патоку спыняецца і ЭРС генератара павялічваецца нязначна.

Пры падключэнні да генератара нагрузкі па абмотках статара пойдзе ток. Токі ў фазных абмотках статара пры сіметрычнай нагрузцы зрушаны па фазе на 120°. Значыць сумарнае магнітнае поле статара з'яўляецца вярчальным магнітным полем. Частата вярчэння магнітнага поля статара супадае з частатой вярчэння магнітнага поля ротара. Такім чынам, магнітнае поле генератара вызначаецца сумай магнітных палёў ротара і

статара. Уздзеянне магнітнага поля статара на магнітнае поле ротара называецца *рэакцыяй статара.* Рэакцыя статара залежыць ад значэння і характару нагрузкі.

Пры актыўнай нагрузцы зрук фаз паміж токам і напружаннем у абмотках статара роўны нулю. Гэта значыць, што максімум току супадае з максімумам напружання ў праваднiках, якія знаходзяцца пад полюсам ротара. Пры гэтым магнітнае поле статара (*N*, *S*) перпендыкулярна к магнітнаму полю ротара (N_0S_0), рэакцыя статара называецца *папярочнай* (рыс. 6.29, *а*).



Рыс. 6.29. Схема рэакцыі статара:

а — папярочнай; *б* — падоўжнай размагнічвальнай; *в* — падоўжнай намагнічвальнай

Пры папярочнай рэакцыі статара магнітнае поле ўзмацняецца на адной палавіне полюса электрамагніта, бо напрамкі магнітных сілавых ліній ротара і статара супадаюць, і паслабляецца на другой палавіне полюса, дзе магнітныя сілавыя лініі ротара і статара маюць процілеглыя напрамкі. Паколькі ўчасткі са скажоным полем малыя, то папярочная рэакцыя статара не выклікае прыкметнага змянення значэння магнітнага поля машыны, а змяняе толькі яго форму. У выніку гэтага ЭРС генератара пры актыўнай нагрузцы застаецца пастаяннай. Невялікае памяншэнне ЭРС генератара пры павелічэнні актыўнай нагрузкі выклікана тым, што на адной палавіне полюсаў электрамагніта наступае магнітнае насычэнне і павелічэнне магнітнага поля не роўнае яго змяншэнню на другой палавіне полюсаў.

Пры індуктыўнай нагрузцы генератара зрух фаз паміж токам і напружаннем у абмотках статара роўны 90°, ток адстае ад напружання па фазе на 90°. У гэтым выпадку максімум току будзе ў праваднiках, якія знаходзяцца паміж полюсамі (рыс. 6.29, *б*). Магнітнае поле статара будзе накіравана ўздоўж восі электрамагніта процілегла накіраванню магнітнага поля ротара. У гэтым выпадку рэакцыя называецца *ўздоўжнай размагнічвальнай.* Зна-

чыць, пры індуктыўнай нагрузцы генератара магнітнае поле машыны змяншаецца, змяншаецца і ЭРС генератара.

Пры ёмістаснай нагрузцы генератара ток у абмотках статара апярэджвае па фазе напружанне на 90°. Значыць, рэакцыя статара будзе ўздоўжнай і павялічваючай магнітнае поле машыны (рыс. 6.29, *в*). ЭРС генератара пры ёмістаснай нагрузцы павялічваецца.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Ад чаго залежыць ЭРС генератара?
2. Як адрозніваюцца па канструкцыі гідрагенератары ад паратурбінных генератараў?
3. Ад чаго залежыць частата ЭРС генератара?
4. Што такое характарыстыка халастога ходу генератара і як яе вызначыць?
5. З якой частатой павінен вярцецца 80-полюсны ротар, каб забяспечыць частату ЭРС у абмотках статара $f = 50$ Гц?

   А д к а з: $n = 1{,}25$ аб/с.
6. Што такое рэакцыя статара?
7. Як залежыць рэакцыя статара ад характару нагрузкі?
8. Ці змяніцца магутнасць генератара пры падключэнні актыўна-ёмістаснай нагрузкі?
9. Які выгляд будзе мець графік залежнасці ЭРС генератара ад магнітнага патоку пры халастым ходзе з пастаяннай частатой вярчэння ротара?

6.10. Вектарныя дыяграмы і характарыстыкі сінхроннага генератара пры рознай нагрузцы

Пры падключэнні генератара на нагрузку ў абмотках статара пойдзе ток, які створыць вярчальнае магнітнае поле статара. Асноўная частка магнітнага патоку статара $Ф_с$ замыкаецца праз ротар і выклікае рэакцыю статара, а другая частка патоку замыкаецца ў статары праз паветра і называецца *магнітным патокам рассеяння* $Ф_р$. У выніку ненасычанасці стрыжня статара і вялікага паветранага зазора паміж статарам і ротарам абодва гэтыя патокі будзем лічыць прапарцыйнымі току статара і супадаючымі з ім па фазе.

Магнітны паток статара $Ф_с$ узбуджае ў статары ЭРС рэакцыі статара $E_с$, а магнітны паток рассеяння — ЭРС рассеяння $E_р$. Асноўная ЭРС E_0, якая ўзбуджаецца магнітным патокам

ротара, ураўнаважвае ЭРС рэакцыі статара E_c і ЭРС рассеяння E_p, стварае падзенне напружання на актыўным супраціўленні статара rI і напружанне на клемах генератра U. Матэматычна гэта можна запісаць у выглядзе комплекснага раўнання:

$$\dot{E}_0 = -\dot{E}_c - \dot{E}_p + r\dot{I} + \dot{U}\,. \tag{6.6}$$

ЭРС рэакцыі статара E_c ураўнаважваецца падзеннем напружання на індуктыўным супраціўленні магнітнага патоку рэакцыі статара, а E_p — падзеннем напружання на індуктыўным супраціўленні магнітнага патоку рассеяння, што можна запісаць так:

$$\dot{U}_c = jx_c\dot{I} = -\dot{F}_c \text{ і } \dot{U}_p = jx_p\dot{I} = -\dot{E}_p\,.$$

Падставім гэтыя выразы ў формулу (6.6), атрымаем раўнанне закону Кірхгофа ў комплекснай форме:

$$\dot{E}_0 = jx_c\dot{I} + jx_p\dot{I} + r\dot{I} + \dot{U}$$

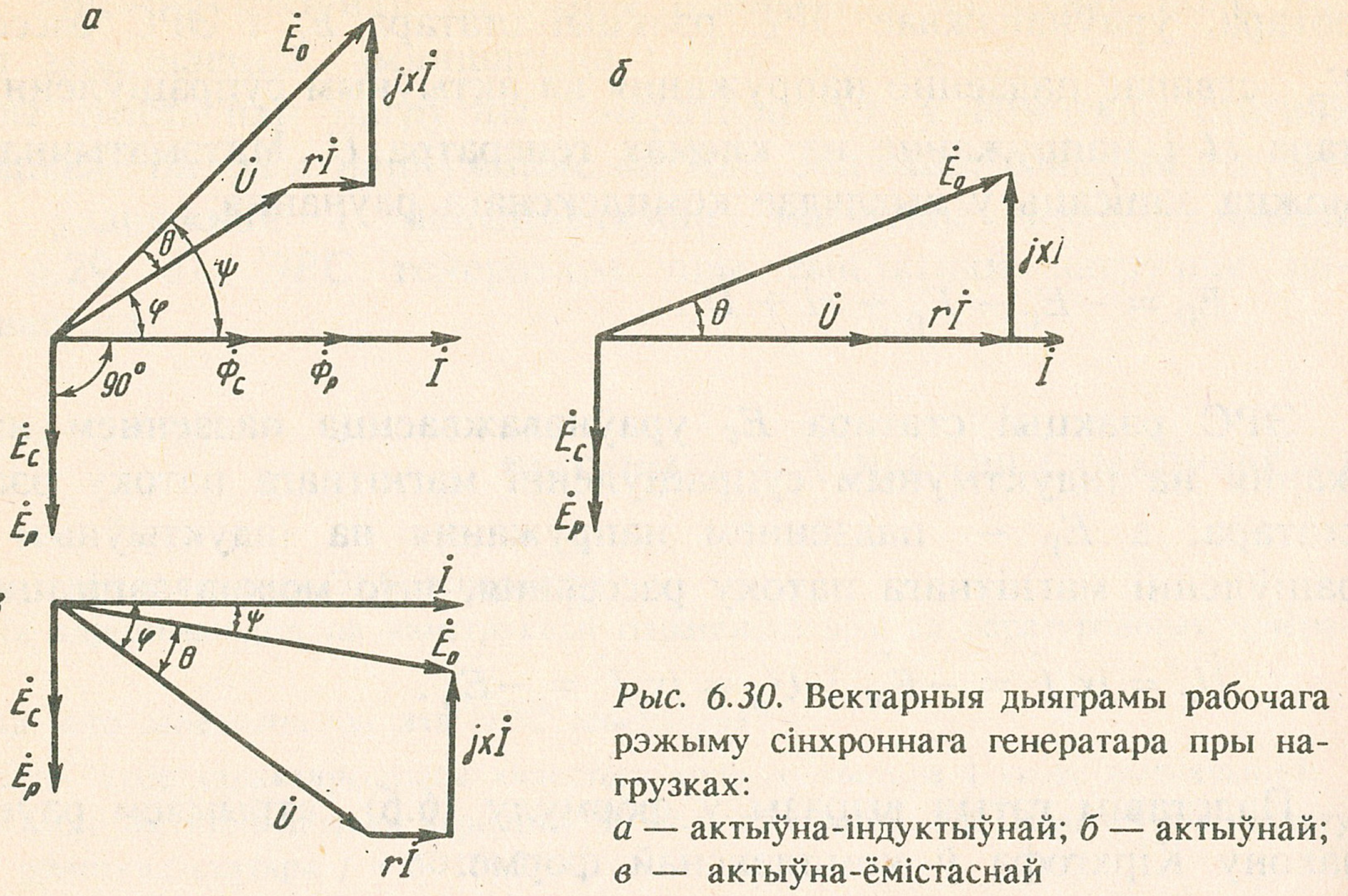
або

$$\dot{E}_0 = j(x_c + x_p)\dot{I} + r\dot{I} + \dot{U}\,, \tag{6.7}$$

дзе r — актыўнае супраціўленне статара; $x_c + x_p$ называецца *сінхронным індуктыўным супраціўленнем статара* і абазначаецца літарай x.

Вектарная дыяграма току і напружанняў рабочага рэжыму сінхроннага генератара пры актыўна-індуктыўнай нагрузцы паказана на рыс. 6.30, *а*. Пры пабудове вектарнай дыяграмы за асноўны вектар прымаецца вектар току нагрузкі. Вектары магнітнага патоку рэакцыі статара $\dot{\Phi}_c$ і рассеяння $\dot{\Phi}_p$ супадаюць з вектарам току, а ўзбуджаемыя імі ЭРС $\dot{E}_c$ і $\dot{E}_p$ адстаюць па фазе на 90°. У выніку наяўнасці ў сетцы індуктыўнага супраціўлення напружанне $\dot{U}$ апярэджвае ток па фазе на вугал φ і вектар напружання зрушаны ў бок станоўчых вуглоў на вугал φ. Вектар падзення напружання на актыўным супраціўленні статара супадае па напрамку з вектарам току, а вектар падзення напружання на сінхронным індуктыўным супраціўленні роўны па значэнні вектару сумы $\dot{E}_c$ і $\dot{E}_p$ і супрацьлегла яму накіраваны. Вектар $\dot{E}_0$, згодна раўнанню (6.7), роўны суме вектараў $\dot{U}$, $r\dot{I}$, $jx\dot{I}$.

На рыс 6.30, *б* прадстаўлена вектарная дыяграма току і напружанняў сінхроннага генератара пры актыўнай нагрузцы, а



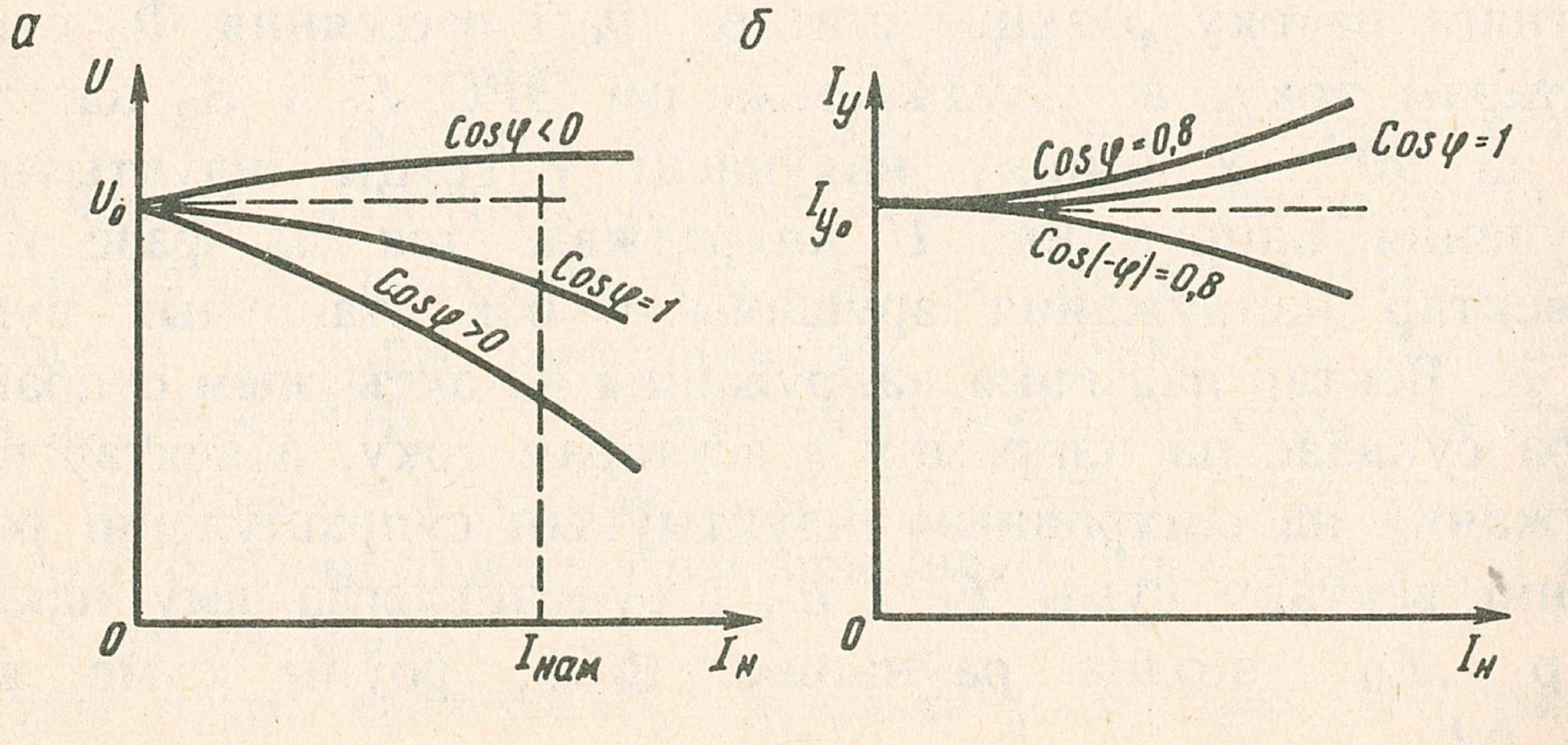
Рыс. 6.30. Вектарныя дыяграмы рабочага рэжыму сінхроннага генератара пры нагрузках:
а — актыўна-індуктыўнай; *б* — актыўнай; *в* — актыўна-ёмістаснай

на рыс. 6.30, *в* — вектарная дыяграма току і напружанняў сінхроннага генератара пры актыўна-ёмістаснай нагрузцы.

На вектарных дыяграмах (рыс. 6.30) бачна, што пры павелічэнні актыўнай і актыўна-індуктыўнай нагрузак напружанне на клемах генератара змяншаецца, а пры павелічэнні ёмістаснай нагрузкі павялічваецца і можа быць большым, чым ЭРС халастога ходу.

Залежнасць напружання генератара ад току нагрузкі пры намінальным значэнні хуткасці называецца *знешняй характарыстыкай генератара.* Знешнія характарыстыкі сінхроннага генератара пры розных відах нагрузкі паказаны на рыс. 6.31, *а.*

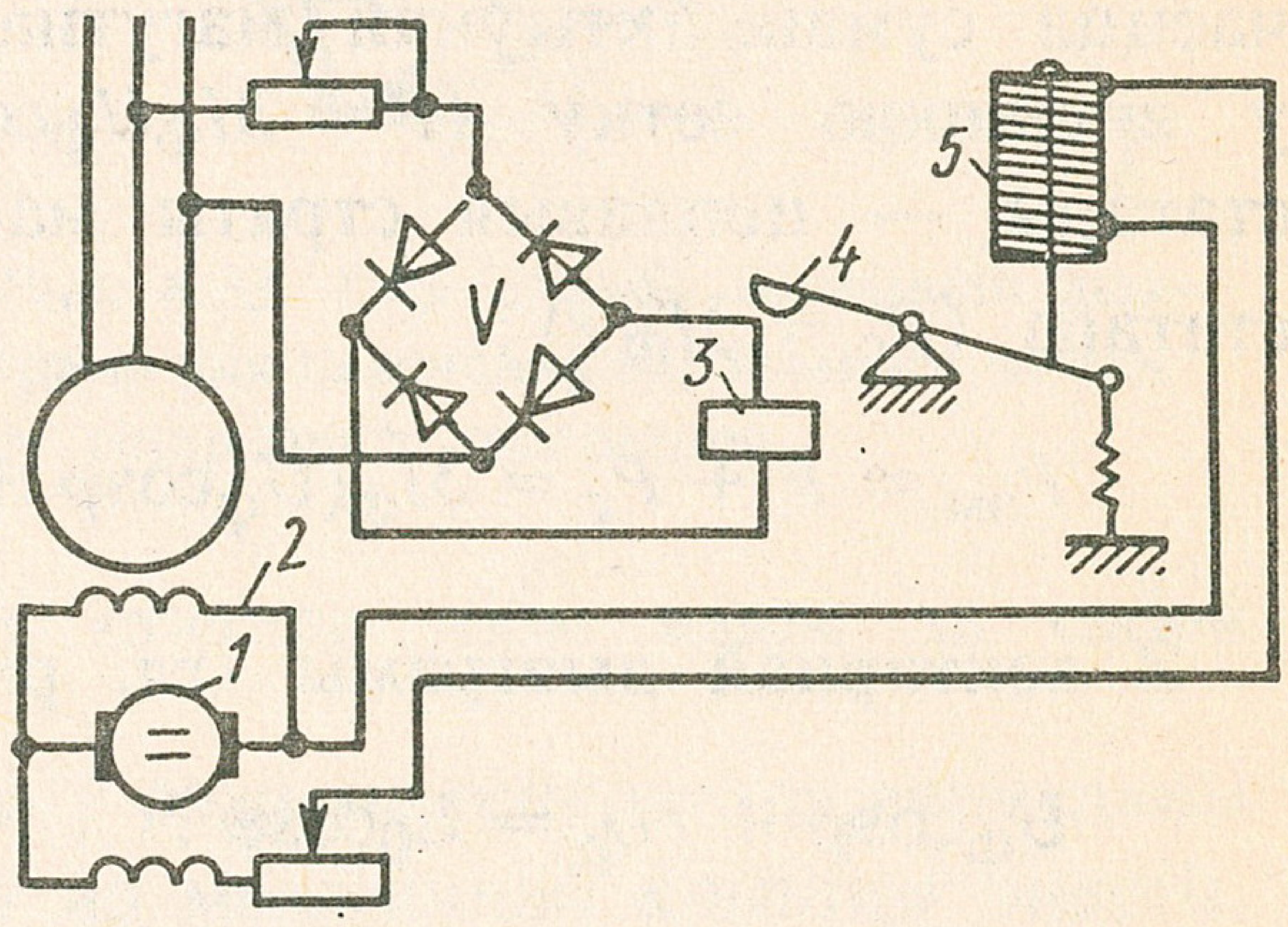
Для захавання напружання на клемах генератара пры змяненні нагрузкі неабходна змяняць ток узбуджэння, гэта значыць змяняць ЭРС генератара. Залежнасць току ўзбуджэння ад току нагрузкі



Рыс. 6.31. Характарыстыкі сінхроннага генератара:
а — знешняя; *б* — рэгулявальная

$I_у = f(I_н)$ пры пастаянным намінальным напружанні на клемах генератара і намінальнай частаце вярчэння ротара называецца *рэгулявальнай характарыстыкай генератара.* Рэгулявальныя характарыстыкі сінхроннага генератара пры розных нагрузках паказаны на рыс. 6.31, *б*.

Для аўтаматычнага падтрымання пастаяннага напружання на клемах генератара прымяняецца вугальны рэгулятар (рыс. 6.32). Аўтаматычнае рэгуляванне напружання ажыццяўляецца з дапамогай вугальнага рэгулятара наступным чынам. Падзенне напружання ў сетцы прыводзіць да змяншэння выпрамленага току праз абмотку электрамагніта *3* і паслаблення прыцяжэння якара *4*. Пры гэтым спружына ўзмацняе націск вугальных шайб, супраціўленне вугальнага слупка *5* змяншаецца, а ток у абмотцы ўзбуджэння ўзбуджальніка *1* павялічваецца. Гэта вядзе да павелічэння магнітнага патоку ў абмотцы *2* ротара генератара і аднаўлення напружання генератара.



Рыс. 6.32. Схема аўтаматычнага рэгулявання напружання генератара

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Напішыце раўнанне Кірхгофа для генератара ў рабочым рэжыме.
2. Растлумачце вектарныя дыяграмы току і напружанняў у рэжыме работы генератара пры рознай нагрузцы.
3. Растлумачце знешнія характарыстыкі генератара.
4. Што паказвае рэгулявальная характарыстыка генератара?
5. Вызначце фазную і лінейную ЭРС трохфазнага генератара, абмоткі статара якога злучаны зоркай, калі пры нагрузцы фазнае напружанне $U_ф =$ 220 В, фазны ток $I_ф =$ 60 А, сінхроннае індуктыўнае супраціўленне фазы генератара $x = 0{,}6$ Ом, актыўнае супраціўленне фазнай абмоткі $r = 0{,}5$ Ом, а $\cos\varphi =$ 0,8.

А д к а з: $E_ф =$ 265,8 В; $E_л =$ 460 В.

6. Трохфазны генератар мае наступныя намінальныя дадзеныя: магутнасць $S_н =$ 520 кВ·А; $U_н =$ 6,3 кВ; частата вярчэння $n_н =$ 2 аб/с; каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi =$ 0,8; частата $f = 50$ Гц. Вызначце лік пар полюсаў ў ротары, намінальны ток у статары, ККД, калі страты ў генератары складаюць $\Delta P = 41$ кВт.

А д к а з: $p = 25$; $I_н =$ 47,7 А; $\eta = 91$ %.

6.11. Электрамагнітная магутнасць і вярчальны момант сінхроннага генератара

Электрамагнітная магутнасць сінхроннага генератара вызначаецца сумай актыўнай магутнасці, якая аддаецца генератарам у знешнюю сетку $(P = 3I_ф U_ф \cos\varphi)$, і стратамі магутнасці ў статары — цеплавыя страты магутнасці на награванне абмотак статара $(P_с = 3I_ф^2 r)$:

$$P_{эм} = P + P_с = 3I_ф(U_ф \cos\varphi + rI_ф).$$

З вектарнай дыяграмы (гл. рыс. 6.30, *а*) бачна, што

$$U_ф \cos\varphi + rI_ф = E_0 \cos\psi.$$

Значыць,

$$P_{эм} = 3I_ф E_0 \cos\psi.$$

Пры раўнамерным вярчэнні ротара сінхроннай машыны вярчальны момант турбіны або іншай крыніцы механічнай энергіі ўраўнаважваецца процідзейным электрамагнітным момантам ротара. Таму для вызначэння вярчальнага моманту можна разлічваць электрамагнітны процідзейны момант. Пры вярчальным руху момант вызначаецца па формуле

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{3}{\omega} I_ф E_0 \cos\psi. \qquad (6.8)$$

Са спрошчанай дыяграмы (рыс. 6.33), не прымаючы ў разлік падзеянне напружання на актыўным супраціўленні статарнай абмоткі, якое складае 1—2 %, можна запісаць:

$$E_0 \cos\psi = U \cos\varphi \text{ і } xI \cos\varphi = E_0 \sin\theta$$

або $I = E_0 \sin\theta / (x \cos\varphi)$.

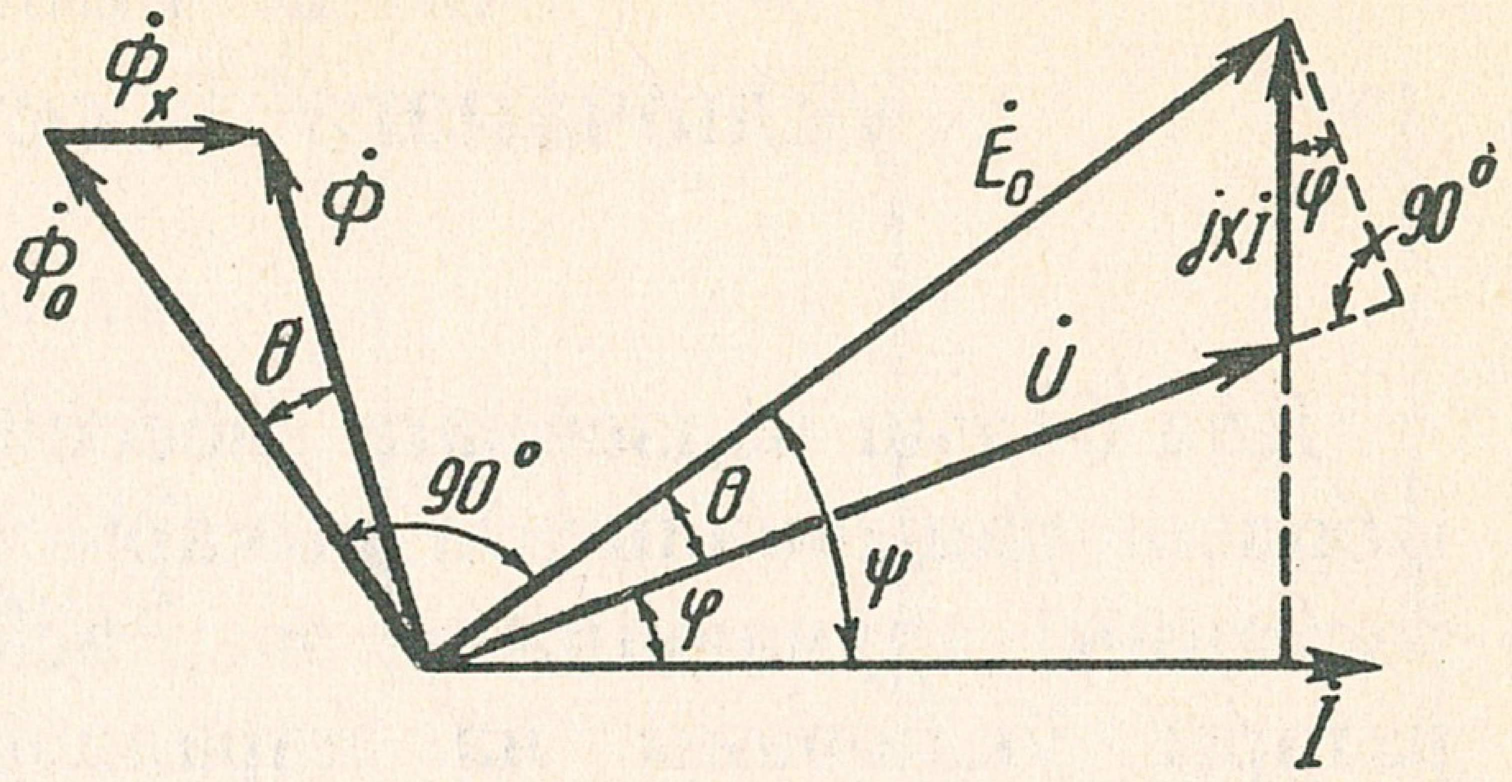
Падставім атрыманыя выразы I і $E_0 \cos\psi$ у формулу (6.8):

$$M = \frac{3}{\omega} \frac{E_0 U}{x} \sin\theta. \qquad (6.9)$$

З раўнання (6.9) бачна, што вярчальны момант залежыць ад ЭРС E_0, напружання на клемах генератара U і зруху фаз паміж імі θ. Фазны вугал θ характарызуе зрух паміж восямі полюсаў

ротара і магнітнага поля статара. На вектарнай дыяграме (рыс. 6.33)

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_x .$$



Рыс. 6.33. Спрошчаная вектарная дыяграма для паяснення вярчальнага моманту сінхроннага генератара

У генератарах магнітнае поле статара адстае ад магнітнага поля ротара, а ў сінхронных рухавіках, наадварот, магнітнае поле ротара адстае ад магнітнага поля статара на вугал θ, значыць, магнітнае поле статара нібы вядзе за сабой ротар.

Пры рабоце сінхроннай машыны ў рэжыме генератара вярчальны момант передаецца ротару звонку ад механічнай крыніцы энергіі, а пры рабоце ў рэжыме рухавіка вярчальны момант ротара ствараецца самой машынай.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца электрамагнітнай магутнасцю генератара?

2. Ад чаго залежыць вярчальны момант генератара? Напішыце формулу вярчальнага моманту генератара.

3. Што паказвае вугал θ і ад чаго ён залежыць?

4. Трохфазны сінхронны генератар, абмоткі статара якога злучаны зоркай, пры лінейным напружанні $U_л = 10$ кВ мае магутнасць $S = 865$ кВ·А. Вызначце ток, электрамагнітную магутнасць, вярчальны момант і ККД генератара, калі пры нагрузцы ён мае $\cos\varphi = 0{,}8$, $n = 25$ аб/с, а страты магутнасці ў абмотках статара складаюць $\Delta P = 36$ кВт.

Адказ: $I = 50$ А; $P_{эм} = 728$ кВт; $M = 4{,}408$ кН·м; $\eta = 95$ %.

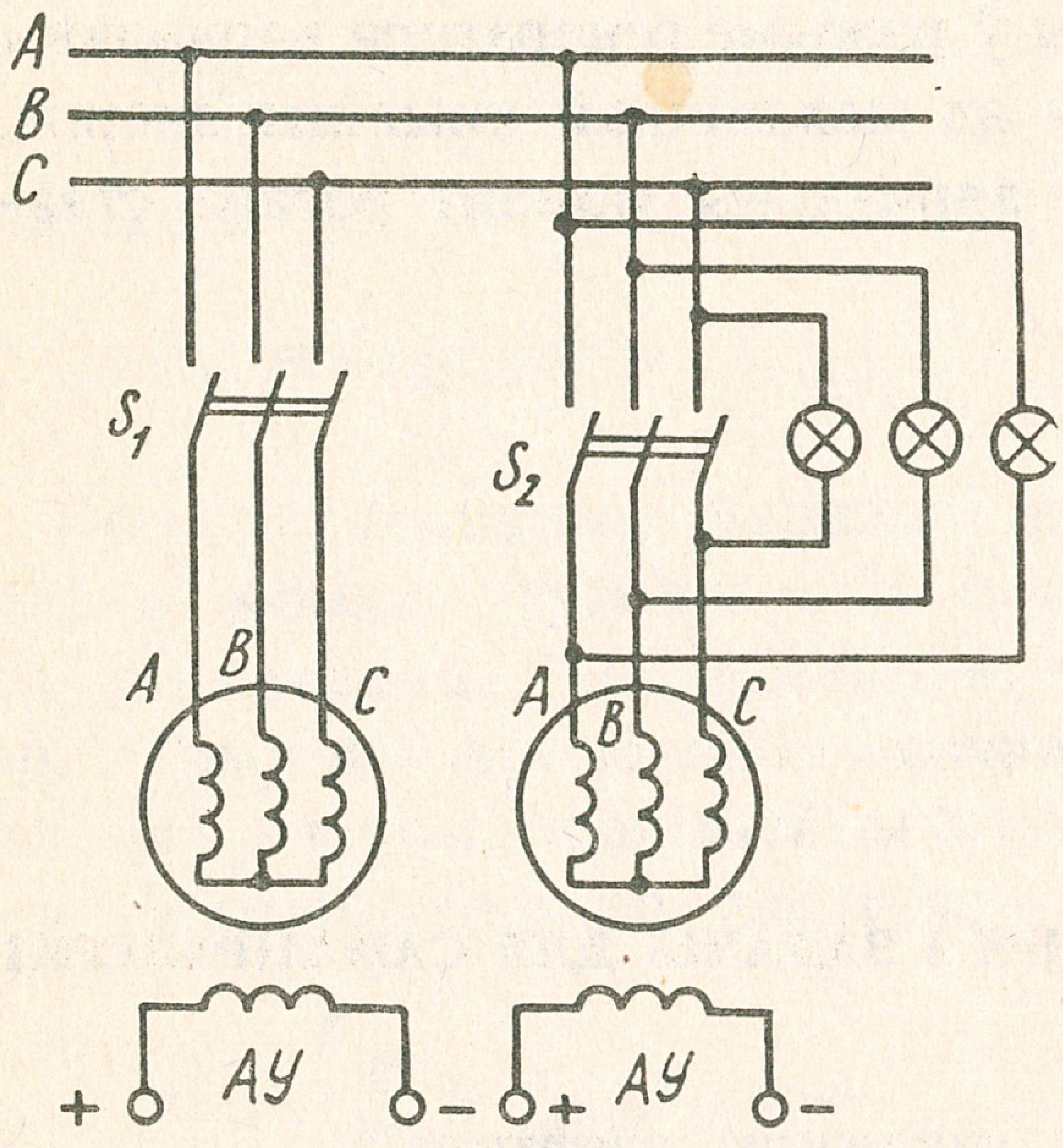
5. Трохфазны сінхронны генератар мае наступныя намінальныя даныя: магутнасць $S_н = 1600$ кВ·А, напружанне $U_н = 6{,}3$ кВ; каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi = 0{,}8$; каэфіцыент карыснага дзеяння $\eta = 95{,}5$ %; частата вярчэння ротара $n_н = 16{,}67$ аб/с і частата току $f = 50$ Гц. Вызначце лік пар полюсаў генератара, ток у статары і электрамагнітную магутнасць.

Адказ: $p = 3$; $I = 146{,}8$ А; $P_{эм} = 1340$ кВт.

6.12. Работа сінхроннага генератара, уключанага ў сетку на паралельную работу

Для больш надзейнага забеспячэння спажыўцоў электраэнергіяй і больш рацыянальнага выкарыстання электраабсталявання электрастанцыі злучаюцца ў энергасістэмы. У энергасістэме ўсе генератары ўключаны на паралельную работу. Пры падключэнні сінхронных генератараў у энергасістэму на паралельную работу неабходна выконваць наступныя ўмовы:

1) правільна чаргаваць фазы, гэта значыць фаза *A* генератара павінна быць падключана да фазы *A* сеткі; адпаведна павінны быць падключаны фазы *B* і *C* (рыс. 6.34);



Рыс. 6.34. Схема ўключэння сінхроннага генератара на паралельную работу

2) ЭРС генератара павінна быць роўная напружанню сеткі: $|E_г| = |U_c|$;

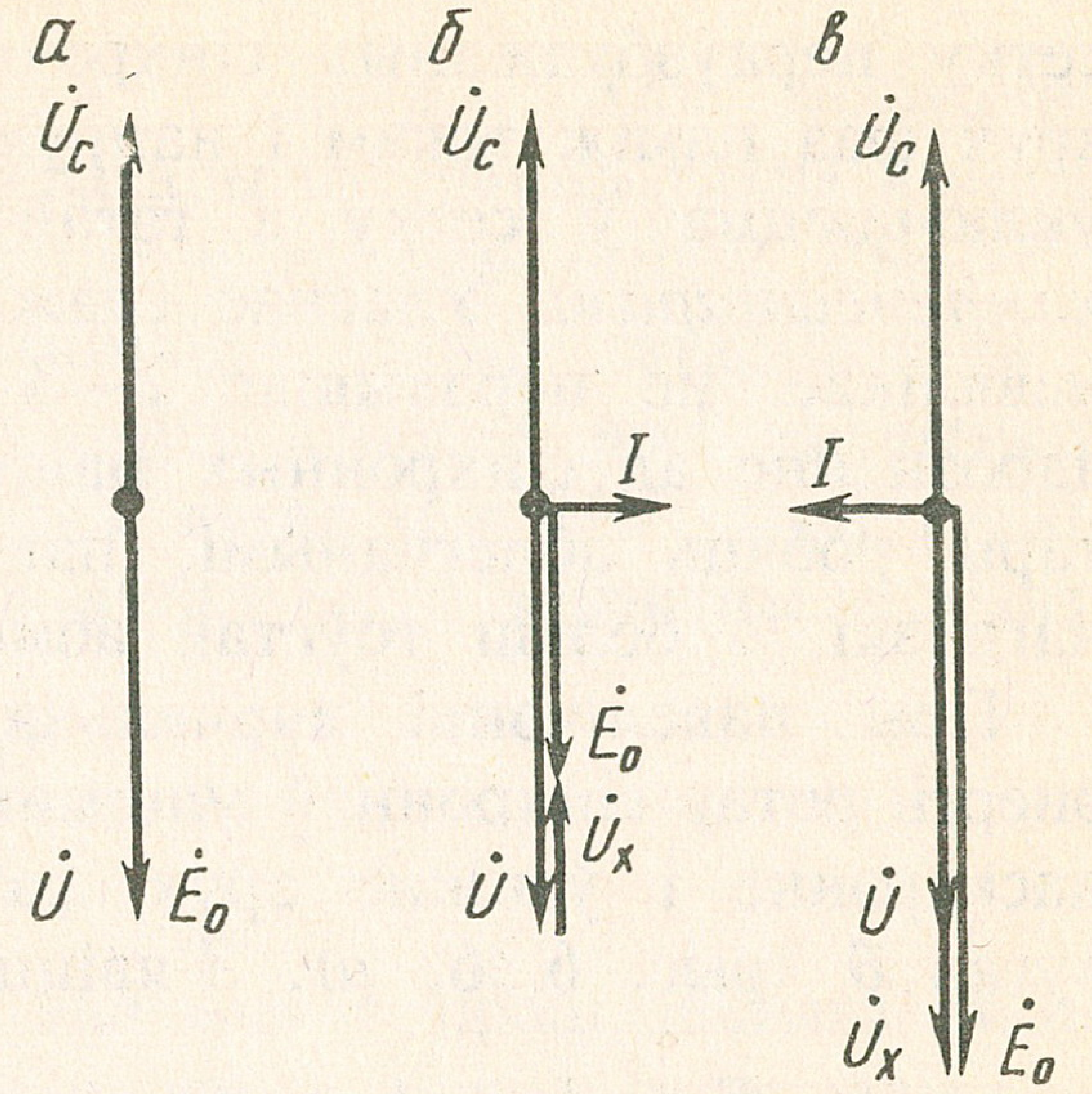
3) частата генератара павінна быць роўная частаце току ў сетцы: $f_г = f_c$.

Роўнасць напружанняў устанаўліваецца шляхам змянення току ў абмотцы ротара генератара, а роўнасць частаты — змяненнем хуткасці вярчэння ротара. Напружанне і частата току вымяраюцца з дапамогай вальтметра і частатамера.

Правільнасць чаргавання фаз вызначаецца сінхранізавальным устройствам, якое складаецца з трох лямпаў, разлічаных на падвойнае лінейнае напружанне генератара і падключаных паралельна трохполюснаму рубільніку. Пры правільным падключэнні фаз і неаднолькавых частотах сеткі і генератара лямпы будуць мігаць з частатой $f = f_c - f_г$. Генератар уключаецца ў сетку ў момант патухання лямпаў. Пасля гэтага генератар сам уцягваецца ў сінхронную работу. Ва ўключаным у сетку на паралельную работу сінхронным генератары ЭРС у кожны момант часу роўная па значэнні і процілеглая па фазе напружанню сеткі. ЭРС генератара і напружанне сеткі запішам у комплексным выглядзе: $\dot{E}_0 = \dot{U} = -\dot{U}_c$ (рыс. 6.35, *a*).

У выніку малога актыўнага супраціўлення статара будзем лічыць, што страты ў машыне адсутнічаюць. Са спрошчанай дыяграмы (гл. рыс. 6.33) маем

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jx} = \frac{\dot{E}_0 + \dot{U}_c}{jx} = 0 .$$



Рыс. 6.35. Вектарныя дыяграмы напружанняў сінхроннага генератара, уключанага на паралельную работу: *а* — нармальна ўзбуджанага; *б* — недаўзбуджанага; в — пераўзбуджанага

Роўнасць нулю току сведчыць аб тым, што генератар не аддае ў сетку энергіі і не спажывае яе з сеткі, гэта значыць — працуе на халастым ходзе.

Генератар, уключаны ў сетку, знаходзіцца ў жорсткім рэжыме сеткі, паколькі яго магутнасць нязначная ў параўнанні з магутнасцю сеткі. Напружанне на клемах генератара заўсёды роўнае напружанню сеткі па значэнні і частаце, а ротар верціцца сінхронна з магнітным полем статара.

Пры змяншэнні току ўзбуджэння (недаўзбуджэння машыны) у генератары змяншаецца ЭРС E_0. У гэтым выпадку $E_0 < U_c$, і з сеткі ў машыну пойдзе ток

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 + \dot{U}_c}{jx} = -j\frac{\dot{U}_x}{x} , \qquad (6.10)$$

дзе $\dot{U}_x$ — падзенне напружання на сінхронным супраціўленні.

З раўнання (6.10) бачна, што ток будзе адставаць ад напружання сеткі $\dot{E}_c$ на 90° і апярэджваць ЭРС генератара па фазе на 90° (рыс. 6.35, *б*). Апераджальны рэактыўны ток ставарае падоўжную намагнічвальную рэакцыю статара і павялічвае напружанне на клемах машыны $\dot{U}$ да ўраўнаважвання напружання сеткі $\dot{U}_c$. Адставанне току ад напружання сеткі на 90° гаворыць аб тым, што машына працуе на халастым ходзе і з'яўляецца рэактыўнай (індуктыўнай) нагрузкай сеткі.

Пры павелічэнні току ўзбуджэння (пераўзбуджэння) машыны $\dot{E}_0 > \dot{U}_c$ (рыс. 6.35, *в*) і ў машыне ток зменіць накіраванне на адваротнае. Гэты ток будзе адставаць ад напружання машыны $\dot{U}$ на 90°. Значыць, пераўзбуджаная машына, падобна кандэнсатару, выклікае ў сетцы апераджальны ток. Зрух фаз паміж токам і напружаннем машыны на 90° гаворыць аб тым, што і ў пераўзбуджаным стане машына працуе на халастым ходзе. У сетцы звычайна пераважае індуктыўная нагрузка, падключэнне ў

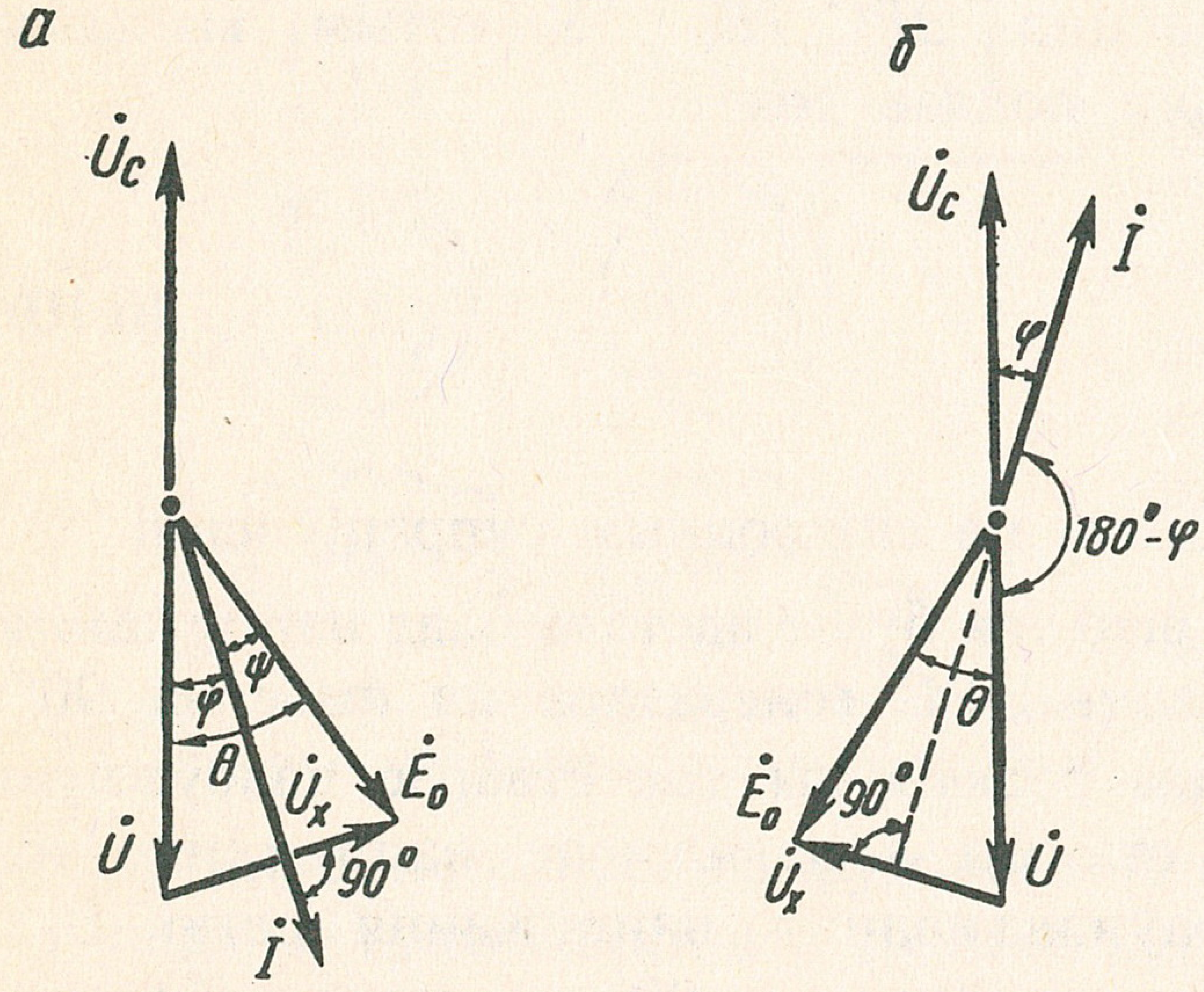
сетку пераўзбуджаных сінхронных машын змяншае (кампенсуе) зрух фаз паміж токам і напружаннем. Сінхронныя машыны, якія ўключаюцца ў сетку з гэтай мэтай, называюцца *сінхроннымі кампенсатарамі.* Уласнае спажыванне магутнасці кампенсатарамі невялікае: не перавышае 2—3 % іх намінальнай магутнасці. У адрозненне ад сінхронных машын іншага прызначэння кампенсатары робяць аблегчанымі, паколькі яны не нясуць механічнай нагрузкі, з больш тоўстай абмоткай узбуджэння.

Пры павелічэнні вярчальнага моманту механічнай крыніцы энергіі ротар сінхроннай машыны, якая ўключана ў сетку, атрымае паскарэнне і ўзнікне зрух фаз паміж ЭРС і напружаннем на вугал θ (рыс. 6.36, *а*). З'явіцца ток у якары машыны

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jx} = \frac{\dot{E}_0 + \dot{U}_c}{jx} = -j\frac{\dot{U}_x}{x},$$

які будзе адставаць ад напружання $\dot{U}_x$ на $90°$.

З рыс. 6.36, *а* бачна, што $\theta < \varphi < 90°$. Такім чынам, электрамагнітная магутнасць машыны $P = 3I_{\text{ф}}U_{\text{ф}}\cos\varphi$ будзе станоўчай.



Рыс. 6.36. Вектарная дыяграма сінхроннага генератара: *а* — пры павелічэнні вярчальнага моманту; *б* — пры памяншэнні

Значыць, машына аддае магутнасць у сетку і з'яўляецца генератарам. Пры гэтым узрастае і процідзейны момант $M = \dfrac{3}{\omega}\dfrac{E_0U}{x}\sin\theta$, які ўраўнаважвае вярчальны момант турбіны або іншай крыніцы механічнай энергіі. Павелічэнне вярчальнага моманту можна працягваць да максімальнага значэння процідзейнага моманту, да $\theta = 90°$.

Далейшае павелічэнне вярчальнага моманту выводзіць машыну з сінхранізму, машына выходзіць з механічнага ўраўнаважвання,

паяўляюцца моцныя ваганні току ў якары. Для захавання ўстойлівай работы сінхронныя генератары будуюцца такім чынам, каб пры намінальнай нагрузцы вугал θ не перавышаў 20—30°.

Пры змяншэнні вярчальнага моманту ротар затармазіцца і вось магнітнага поля ротара змесціцца адносна восі магнітнага поля статара на адмоўны прасторавы вугал $\alpha = \theta / p$. Пры гэтым ЭРС E_0 будзе адставаць ад U на вугал θ, а магнітны момант

$$M = \frac{3}{\omega} \frac{E_0 U}{x} \sin(-\theta) = -\frac{3}{\omega} \frac{E_0 U}{x} \sin \theta$$

зменіць знак на адваротны, гэта значыць з процідзейнага стане вярчальным, а сінхронная машына пяройдзе ў рэжым рухавіка.

З дыяграмы на рыс. 6.36, *б* бачна, што пры адставанні $\dot{E}_0$ ад $\dot{U}$ на вугал θ напружанне $\dot{U}_x$ зменіць свой кірунак амаль на процілеглы, ток у статары $\dot{I}$ будзе адставаць ад $\dot{U}_x$ па фазе на 90° і складзе вугал φ з напружаннем сеткі $\dot{U}_c$, а з напружаннем генератара $\dot{U}_г$ — вугал $180° - \varphi$. Гэта значыць, што сетка аддае магутнасць ($P_c = 3 I_ф U_ф \cos\varphi$), а машына атрымлівае магутнасць ($P = 3 I_ф U_ф \cos(180° - \varphi) = -3 I_ф U_ф cos\varphi$) — пераходзіць у рэжым сінхроннага рухавіка.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як ўключаецца сінхронны генератар у сетку на паралельную работу?
2. Чым вызначаецца правільнасць чаргавання фаз пры ўключэнні генератара ў сетку на паралельную работу?
3. Як устанаўліваецца роўнасць частот ЭРС генератара і напружання сеткі?
4. Пры якой умове трохфазная сінхронная машына будзе прадстаўляць рэактыўную нагрузку сеткі?
5. У якім рэжыме трохфазная сінхронная машына будзе працаваць сінхронным кампенсатарам?
6. Пры якой умове трохфазная сінхронная машына будзе працаваць у рэжыме генератара? У рэжыме рухавіка?
7. Да чаго прывядзе адначасовае павелічэнне току ўзбуджэння і вярчальнага моманту ў сінхроннай машыне, якая падключана ў сетку на паралельную работу?
8. Сінхронная машына ўключана ў сетку з фазным напружаннем $U_ф = 220$В і частатой $f = 50$ Гц і працуе з пераўзбуджэннем у рэжыме сінхроннага кампенсатара, $E = 230$ В. Вызначце ёмістасць канденсатараў, якія эквівалентныя кампенсатару. Рэактыўнае супраціўленне фазнай абмоткі статара $x = 0{,}5$ Ом (актыўнае супраціўленне ў разлік не прымайце).

А д к а з: $C = 867{,}9$ мкФ.

9. Сінхронная машына, якая падключана ў сетку на паралельную работу, мае ЭРС, роўную фазнаму напружанню сеткі $U_ф = 220$ В, вугал $\theta = 20°$, фазныя абмоткі статара злучаны зоркай і маюць рэактыўнае супраціўленне $x = 0{,}8$ Ом

(актыўнае супраціўленне не улічваць). Вызначце ток і магутнасць машыны пры рабоце ў генератарным рэжыме.

Адказ: I = 95,97 A; P = 62,05 кВт.

6.13. Сінхронны рухавік, вуглавая і механічная характарыстыкі

Сінхронныя машыны маюць уласцівасць абарачальнасці. Уключэнне трохфазнай абмоткі статара сінхроннай машыны ў электрычную сетку стварае вярчальнае магнітнае поле статара, якое ўзаемадзейнічае з магнітным полем ротара і прыводзіць ротар у сінхроннае вярчэнне. Ротар пры вярчэнні можа пераадолець механічнае тармажэнне, гэта значыць машына з'яўляецца рухавіком. Уключэнне сінхроннага рухавіка ў трохфазную сетку аналагічна ўключэнню сінхроннага генератара. Сінхронны рухавік пры ўключэнні ў сетку не можа прыйсці ў вярчэнне, ротар яго будзе вібрыраваць. Сапраўды, пры частаце пераменнага току сеткі 50 Гц двухполюснае магнітнае поле статара будзе рабіць 50 абаротаў у секунду. Пры гэтым кожны полюс ротара атрымае 50 штуршкоў у секунду па ходу гадзіннікавай стрэлкі і 50 — у зваротным кірунку, бо ротар у сілу сваёй інертнасці не паспее павярнуцца за магнітным полем. На практыцы прымяняецца асінхронны пуск сінхроннага рухавіка, на ротары сінхроннага рухавіка размяшчаецца каротказамкнутая абмотка ў выглядзе вавёрчына кола.

Пры ўключэнні рухавіка ў сетку каротказамкнутая абмотка разганяе ротар без нагрузкі да частаты вярчэння магнітнага поля. Пасля дасягнення сінхранізму ў вярчэнні ротара і магнітнага поля абмотка ротара падключаецца да ўзбуджальніка.

У некаторых сінхронных рухавіках пуск ажыццяўляецца без адключэння абмоткі ротара, значыць, абмотка ротара і ў момант пуску злучана з узбуджальнікам, які знаходзіцца на адным валу з ротарам рухавіка. Пры гэтым па меры разгону ротара пускавой абмоткай рухавік узбуджаецца і ўваходзіць у сінхранізм.

У час работы сінхроннага рухавіка ток і ЭРС пускавой абмоткі роўныя нулю, паколькі ротар верціцца сінхронна з полем статара. Вярчальны момант таксама роўны нулю. Пры ваганні ротара ў час работы рухавіка пускавая абмотка садзейнічае яго супакаенню.

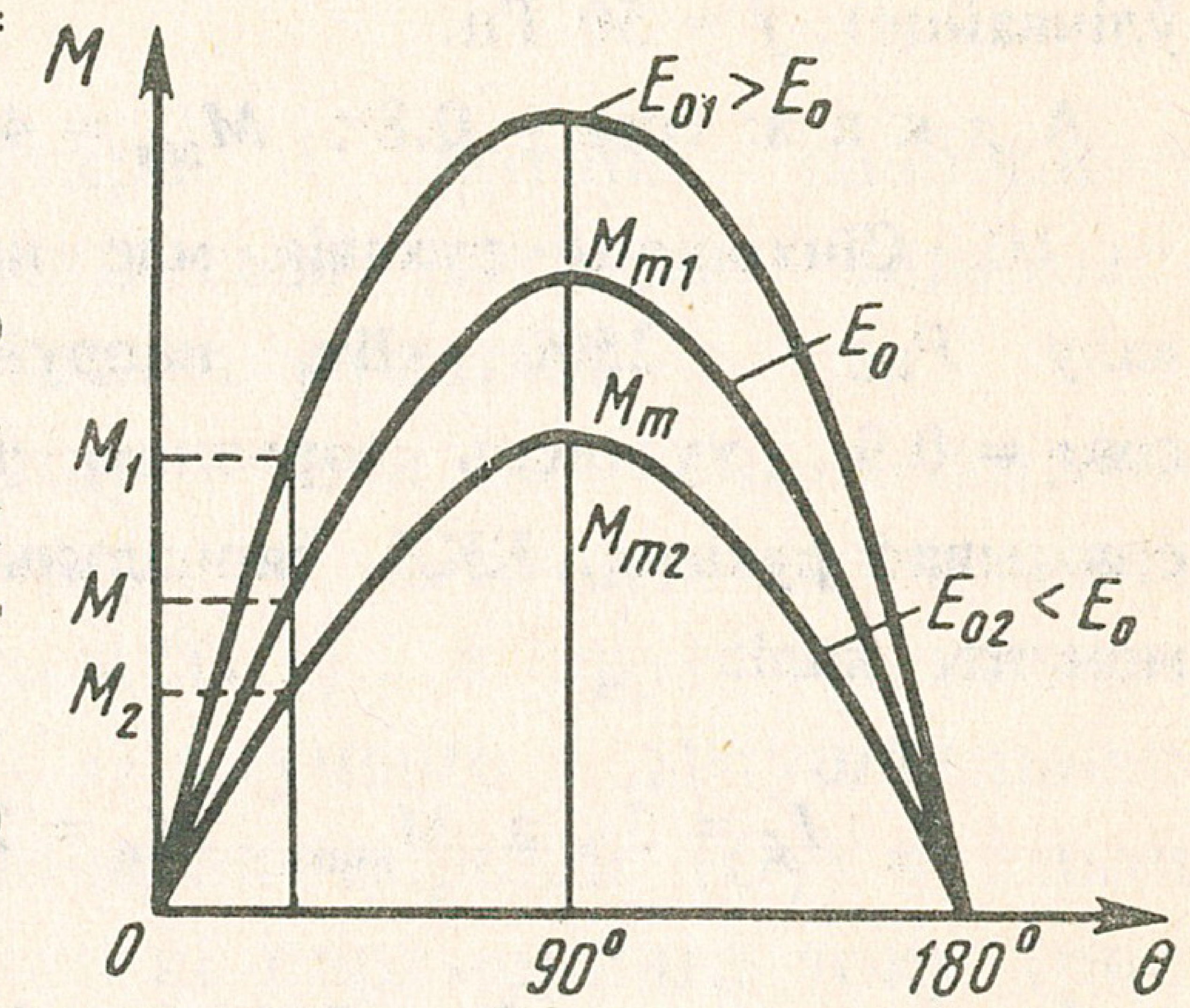
Сінхронныя рухавікі маюць пастаянную хуткасць вярчэння. Гэта дае магчымасць іх шырокага прымянення на металургічных заводах і шахтах для прывода насосаў, вентылятараў, кампрэсараў і шэрага іншых механізмаў, якія патрабуюць пастаяннай хуткасці. У сельскай гаспадарцы сінхронныя рухавікі прымяняюцца на насосных устаноўках буйных арашальных сістэм.

Электрамагнітны момант сінхроннага рухавіка з'яўляецца вярчальным момантам:

$$M = \frac{3}{\omega}\frac{E_0 U}{x}\sin\theta .$$

Пры пастаянных напружанні і току ўзбуджэння будзем мець пастаянныя значэнні U = const і E_0 = const , вярчальны момант сінусоідна залежыць ад θ (рыс. 6.37).

Максімальны вярчальны момант мае месца пры $\theta = 90°$: $M = \frac{3}{\omega}\frac{E_0 U}{x}$. З гэтага раўнання бачна, што калі змяняць ток узбуджэння, то будзе змяняцца максімальны вярчальны момант рухавіка і такім чынам можна рэгуляваць вярчальны момант рухавіка пры дадзеным θ (рыс. 6.37). Гэта з'яўляецца станоўчай якасцю сінхронных рухавікоў.



Рыс. 6.37. Вуглавая характарыстыка сінхроннага рухавіка

Пры павелічэнні нагрузкі рухавіка (тармазнога моманту) ротар затармазіцца, што прывядзе да павелічэння вугла θ. Пры гэтым павялічваецца вярчальны момант і сінхронная хуткасць ротара аднаўляецца. Такі працэс будзе адбывацца ў рухавіку да $\theta = 90°$. Далейшае павелічэнне нагрузкі павялічвае вугал θ, але вярчальны электрамагнітны момант, наадварот, будзе змяншацца і рухавік спыніцца, а абмоткі статара могуць згарэць. У дадзеным выпадку патрэбна хутка зняць нагрузку з рухавіка, а пускавая абмотка зноў прывядзе ротар у сінхроннае вярчэнне.

Нармальным рэжымам работы сінхроннага рухавіка лічыцца пераўзбуджаны стан, пры якім $\cos\varphi = 1$, і механічная нагрузка, пры якой θ = 20—30° . У рэжыме нармальнай работы рухавіка хуткасць ротара не залежыць ад нагрузкі і механічная характарыстыка $n = f(M)$ прадстаўляе сабой прамую, паралельную восі момантаў нагрузкі рухавіка.

1. У чым сутнасць абарачальнасці сінхронных машын?

2. Як ажыццяўляецца пуск сінхронных рухавікоў?

3. Як залежыць вярчальны момант сінхроннага рухавіка ад вугла θ?

4. Ад чаго залежыць найбольшае значэнне вярчальнага моманту сінхроннага рухавіка?

5. Як рэгулюецца вярчальны момант сінхроннага рухавіка?

6. Што называецца вуглавой характарыстыкай сінхроннага рухавіка? Механічнай характарыстыкай сінхроннага рухавіка? Як яны будуюцца?

7. Чым растлумачыць жорсткасць механічнай характарыстыкі сінхроннага рухавіка?

8. Дзе прымяняюцца сінхронныя рухавікі ў народнай гаспадарцы?

9. Сінхронны рухавік мае наступныя пашпартныя даныя: $P_н = 20$ кВт; напружанне фазнае $U_н = 220$ В; ток фазны $I_н = 36$ А. Вызначце $\cos\varphi$ і электрамагнітны момант рухавіка, калі пры намінальнай нагрузцы вугал $\theta = 20°$; ЭРС статарнай абмоткі $E_0 = 240$ В; рэактыўнае супраціўленне $x = 0{,}4$ Ом (актыўнае супраціўленне не ўлічвайце); $f = 50$ Гц.

Адказ: $\cos\varphi = 0{,}8$; $M_{эм} = 431{,}1$ Н·м.

10. Сінхронны рухавік мае наступныя намінальныя даныя: магутнасць на валу $P_{н2} = 2500$ кВт, напружанне $U = 6000$ В, ток $I_н = 280$ А, $\cos\varphi = 0{,}9$, хуткасць вярчэння $n_н = 50$ аб/с. Вызначце магутнасць, якую спажывае рухавік, ККД, вярчальны момант рухавіка, пускавы ток і максімальны момант, калі:

$$I_п : I_н = 3, \text{ а } M_{макс} : M_н = 2{,}3.$$

Адказ: $P_1 = 2615{,}8$ кВт; $\eta = 95{,}57$ %; $M = 7{,}96$ кН·м; $I_п = 840$ А; $M_{макс} = 18{,}3$ кН·м.

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 11

Даследаванне кароткназамкнутага трохфазнага асінхроннага рухавіка

Мэта работы: вывучыць устройства трохфазнага асінхроннага рухавіка з кароткназамкнутым ротарам, навучыцца здымаць рабочыя характарыстыкі рухавіка.

Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен вывучыць устройства рухавіка, выканаць разметку вывадаў абмотак статара,

навучыцца падключаць рухавік у трохфазную сетку, здымаць рабочыя характарыстыкі і будаваць графікі рабочых характарыстык.

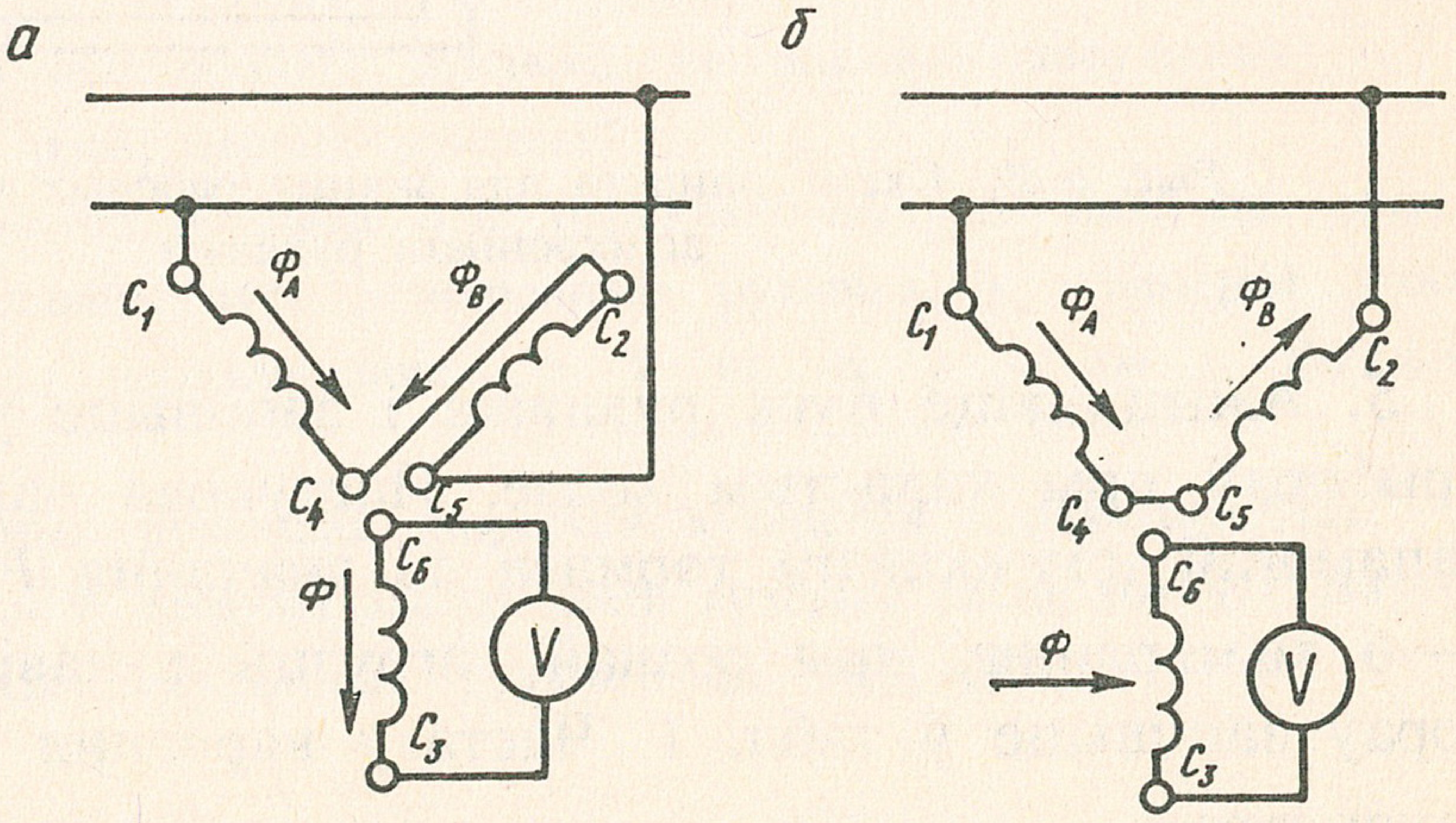
Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 6.1—6.6 падручніка. Рабочыя характарыстыкі рухавіка з каротказамкнутым ротарам прадстаўляюць сабой графічны выраз залежнасці частаты вярчэння ротара ад магутнасці, якая здымаецца з вала рухавіка $n_2 = f(P_2)$, току ў статары ад магутнасці $I_1 = f(P_2)$, ККД рухавіка ад магутнасці $\eta = f(P_2)$. Да рабочых характарыстык належыць таксама механічная характарыстыка $n_2 = f(M)$.

Выкананне работы

1. Разглядзіце ўстройства статара і ротара разборнага асінхроннага рухавіка з каротказамкнутым ротарам. Запішыце пашпартныя даныя разборнага і рабочага рухавікоў.

2. Размецьце выпады абмотак статара, гэта значыць вызначце пачаткі і канцы фазных абмотак статара. Для гэтага адзін вывад любой з трох фаз лічыце яе пачаткам (C_1), а другі — канцом (C_4). Далей канец першай абмоткі (C_4) злучыце з дапушчальным пачаткам другой абмоткі (C_2), а пачатак першай (C_1) і канец другой абмотак (C_5) падключыце да сеткі пераменнага току (рыс. 6.38, *а*). Калі дапушчальныя намі пачатак і канец другой фазнай абмоткі ў сапраўднасці сталі імі, то вальтметр, падключаны да трэцяй абмоткі, пакажа ў ёй напружанне. У гэтым выпадку сумарны магнітны паток першых дзвюх фазных абмотак пранізвае плоскасць абмоткі трэцяй фазы і ўзбуджае ў ёй ЭРС.

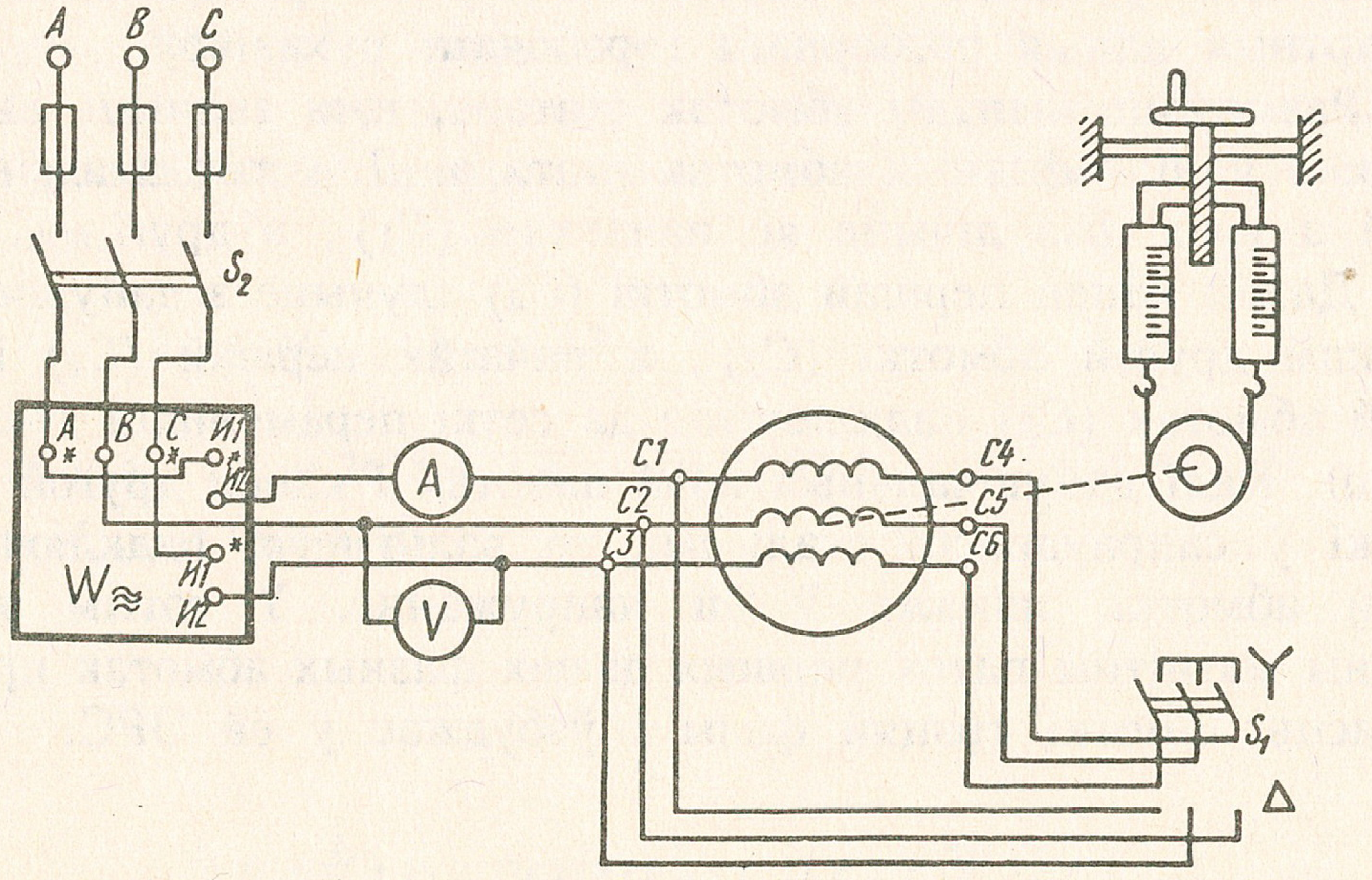


Рыс. 6.38. Схема разметкі вывадаў абмотак статара асінхроннага рухавіка

Калі дапушчальны пачатак другой абмоткі акажацца ў сапраўднасці яе канцом, а канец — пачаткам, то вальтметр не пакажа напружання ў трэцяй абмотцы. У гэтым выпадку сумарны магнітны паток першых дзвюх фазных абмотак будзе размешчаны ў плоскасці віткоў абмоткі трэцяй фазы і не ўзбудзіць у ёй ЭРС (рыс. 6.38, *б*). Аналагічна паступаюць і для вызначэння пачатку і канца трэцяй фазнай абмоткі пры падключэнні вальтметра да другой фазнай абмоткі.

3. Злучыце абмоткі статара разборнага рухавіка зоркай, падключыце ў сетку і прадэманструйце вярчэнне магнітнага поля статара. Для гэтага пакладзіце стальны шарык унутр статара, і ён будзе вярцецца. Змяніце паміж сабой падключэнне дзвюх фаз да статара і прадэманструйце рэверсаванне.

4. Збярыце электрычны ланцуг па схеме рыс. 6.39. Калі ў пашпарце асінхроннага рухавіка ўказана Y/Δ — 380/220, то пуск рухавіка ажыццяўляецца шляхам пераключэння з Y на Δ, калі ў сетцы лінейнае напружанне 220 В. Пры лінейным напружанні сеткі 380 В рухавік падключаецца ў сетку зоркай.



Рыс. 6.39. Схема ланцуга для зняцця рабочых характарыстык асінхроннага рухавіка

5. Ажыццявіце пуск рухавіка і запішыце ў табл. 1 паказанні прыбораў пры халастым ходзе. Паступова нагружайце рухавік з дапамогай істужкавага тормаза да значэння $P_2 = 1{,}2P_{н2}$. Зрабіце 5—6 вымярэнняў пры рознай нагрузцы рухавіка. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1. Частату вярчэння ротара n_2 змерайце тахометрам.

Т а б л і ц а 1

Вымярэнні						Вылічэнні				
I_1, А	U_1, В	P_1, Вт	n_2	$F_1 - F_2$, Н	D*, м	M,Н·м	P_2, Вт	$\cos\varphi$	S	η

*D — дыяметр шківа рухавіка; F_1 і F_2 — паказанні дынамаметраў істужкавага тормаза.

6. Па паказаннях прыбораў вылічыце:

М — вярчальны момант рухавіка, які вызначаецца здабыткам сілы на вобадзе шківа і радыуса шківа. Сіла F на вобадзе шківа роўная рознасці паказанняў дынамаметраў: $F = F_1 - F_2$;

P_2 — магутнасць на валу рухавіка: $P_2 = M\omega = M2\pi n_2$, дзе ω — вуглавая хуткасць ротара; n_2 — частата вярчэння ротара;

$\cos\varphi$ вызначаецца па формуле $\cos\varphi = P_1/(\sqrt{3}\, IU)$.

Каэфіцыент карыснага дзеяння вызначаецца па формуле $\eta = P_2/P_1$, а слізгаценне $S = (n_1 - n_2)/n_1$.

Вымярэнні і вылічэнні рабіце ў сістэме *СІ*.

7. У агульнай сістэме каардынат начарціце графікі рабочых характарыстык.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Як ажыццявіць разметку вывадаў абмотак статара?
2. Чаму пры злучэнні вывадаў C_4 і C_5 і падключэнні вывадаў C_1 і C_2 фазных абмотак у сетку пераменнага току вальтметр, падключаны да трэццяй абмоткі статара асінхроннага рухавіка, не пакажа напружання?
3., Як выконваецца рэверсаванне рухавіка?
4. Ці будзе рэверсаванне рехавіка пры пераключэнні ўсіх трох фаз сеткі?
5. Ці можна ажыццявіць пуск асінхроннага рухавіка, у пашпарце якога ўказана Y/Δ— 380/220, пераключэннем з Y на Δ у сетцы з фазным напружаннем 220 В?
6. Чаму ў асінхронных рухавіках жорсткая хуткасная характарыстыка?
7. Чаму пры павелічэнні нагрузкі асінхроннага рухавіка расце ток у статары?
8. Як залежыць ККД асінхроннага рухавіка ад нагрузкі?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 12

Уключэнне трохфазнага асінхроннага рухавіка ў аднафазную сетку

Мэта работы: навучыцца ўключаць трохфазны асінхронны рухавік у аднафазную сетку. Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен набыць уменні і практычныя навыкі ўключэння трохфазных асінхронных рухавікоў у аднафазную сетку.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 6.7 падручніка.

Выкананне работы

1. Вывучыце пашпартныя даныя трохфазнага асінхроннага рухавіка з каротказамкнутым ротарам і вызначце схему ўключэння яго ў аднафазную сетку напружаннем 220 або 127 В.

2. Па пашпартных даных асінхроннага рухавіка разлічыце ёмістасць кандэнсатара $C_р$ для падключэння ў пускавую абмотку і ёмістасць пускавога кандэнсатара $C_п$.

3. Збярыце схему (гл. рыс. 6.23, *а*) уключэння дадзеннага трохфазнага асінхроннага рухавіка ў аднафазную сетку без пускавога кандэнсатара.

4. Уключыце трохфазны рухавік у аднафазную сетку і ажыццявіце пуск і рэверсаванне рухавіка.

5. Збярыце схему (гл. рыс. 6.23, *в*) уключэння трохфазнага асінхроннага рухавіка ў аднафазную сетку без пускавога кандэнсатара.

6. Уключыце трохфазны рухавік у аднафазную сетку і ажыццявіце пуск і рэверсаванне рухавіка.

7. Збярыце схему (гл. рыс. 6.24) уключэння трохфазнага асінхроннага рухавіка ў аднафазную сетку без пускавого кандэнсатара.

8. Уключыце трохфазны рухавік у аднафазную сетку і ажыццявіце пуск і рэверсаванне рухавіка.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Як вызначыць, па якой схеме належыць уключаць дадзены трохфазны рухавік у дадзеную аднафазную сетку? Чым трэба кіравацца пры выбары схемы?

2. Якія тыпы кандэнсатараў выкарыстоўваюцца для ўключэння ў пускавую абмотку і для пуску рухавіка пад нагрузкай?

3. Як разлічваецца ёмістасць кандэнсатараў, якія ўключаюцца ў пускавую абмотку, і пускавых кандэнсатараў?

4. Як ажыццяўляецца рэверсаванне трохфазнага асінхроннага рухавіка пры аднафазным уключэнні?

5. Ці будзе працаваць трохфазны асінхронны рухавік, у пашпарце якога ўказана Y/Δ —380/220, калі уключыць яго ў сетку напружаннем 220 В зоркай па схеме на рыс. 6.23?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 13

Вывучэнне магнітнага пускальніка

М э т а р а б о т ы: вывучыць устройства і прынцып дзеяння магнітнага пускальніка і цеплавога рэле.

У выніку выканання лабараторнай работы студэнт павінен вывучыць устройства магнітнага пускальніка, навучыцца падключаць магнітны пускальнік для незалежнага кіравання рухавіком з двух месц.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 6.6 падручніка. Магнітны пускальнік устанаўліваецца на сцянцы або на шчыце ў вертыкальным становішчы. Гэта робіцца для таго, каб пры націску на кнопку «Стоп» пры разрыве ланцуга аператыўнага току якар электрамагніта пад дзеяннем сілы цяжару перамясціўся ўніз і разамкнуў галоўныя кантакты і блок-кантакт. Верхнія кантакты магнітнага пускальніка праз плаўкія засцерагальнікі падключаюцца ў сетку, а два ніжнія кантакты і адзін верхні — да рухавіка. Клемы блок-кантакта магнітнага пускальніка злучаюцца з клемай *1* кнопкі «Стоп» і клемай *3* кнопкі «Пуск», як паказана на рыс. 6.18, *а.* На кнопку

«Пуск» націскаюць толькі ў момант пуску рухавіка. Пры націску на кнопку «Пуск» замыкаецца ланцуг апаратыўнага току і якар электрамагніта ўцягваецца ў катушку і замыкае галоўныя кантакты і блок-кантакт. Блок-кантакт забяспечвае замыканне ланцуга апаратыўнага току пры разамкнутых клемах кнопкі «Пуск», гэта значыць блакіруе кнопку «Пуск».

Магнітны пускальнік служыць для аўтаматычнага пуску і спынення асінхроннага рухавіка, але ён не можа забяспечыць плаўны пуск рухавіка або пуск пераключэннем з зоркі на трохвугольнік.

Выкананне работы

1. Вывучыце устройства магнітнага пускальніка і блока кнопак кіравання. Прасачыце шлях току з сеткі да рухавіка, шлях апаратыўнага току пры пуску і пасля пуску рухавіка.

2. Падключыце ў сетку асінхронны рухавік з каротказамкнутым ротарам з дапамогай магнітнага пускальніка па схеме на рыс. 6.18, *а*. Ажыццявіце пуск і спыненне рухавіка з дапамогай кнопак кіравання.

3. Складзіце электрычны ланцуг для незалежнага кіравання рухавіком з двух месц па схеме на рыс. 6.18, *б*. Ажыццявіце незалежнае кіраванне (пуск і спыненне) рухавіка з двух месц.

4. Падключыце ў сетку асінхронны рухавік з дапамогай рэверсіўнага магнітнага пускальніка па схеме на рыс. 6.20. Ажыццявіце пуск, спыненне і рэверсаванне рухавіка.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ І ЗАДАННІ

1. З якіх асноўных частак складаецца магнітны пускальнік?
2. Як пабудавана цеплавое рэле і для чаго яно служыць?
3. Пакажыце па схеме шлях току з сеткі да рухавіка праз магнітны пускальнік пры націску кнопкі «Пуск».
4. Пакажыце па схеме шлях апаратыўнага току пры пуску і пасля замыкання блок-кантакту.
5. Для чаго служыць блок-кантакт у магнітным пускальніку?
6. Як злучаюцца кнопкі «Пуск» і «Стоп» блокаў кнопачнага кіравання для незалежнага кіравання рухавіком з двух месц?
7. Як пабудаваны рэверсіўны магнітны пускальнік? У чым заключаецца прынцып яго дзеяння?
8. Пакажыце па схеме шлях току з сеткі да рухавіка праз рэверсіўны магнітны пускальнік пры націску кнопак «Уперад», «Назад».
9. Пакажыце па схеме шлях апаратыўнага току пры націску кнопак «Уперад», «Назад».

7

МАШЫНЫ ПАСТАЯННАГА ТОКУ

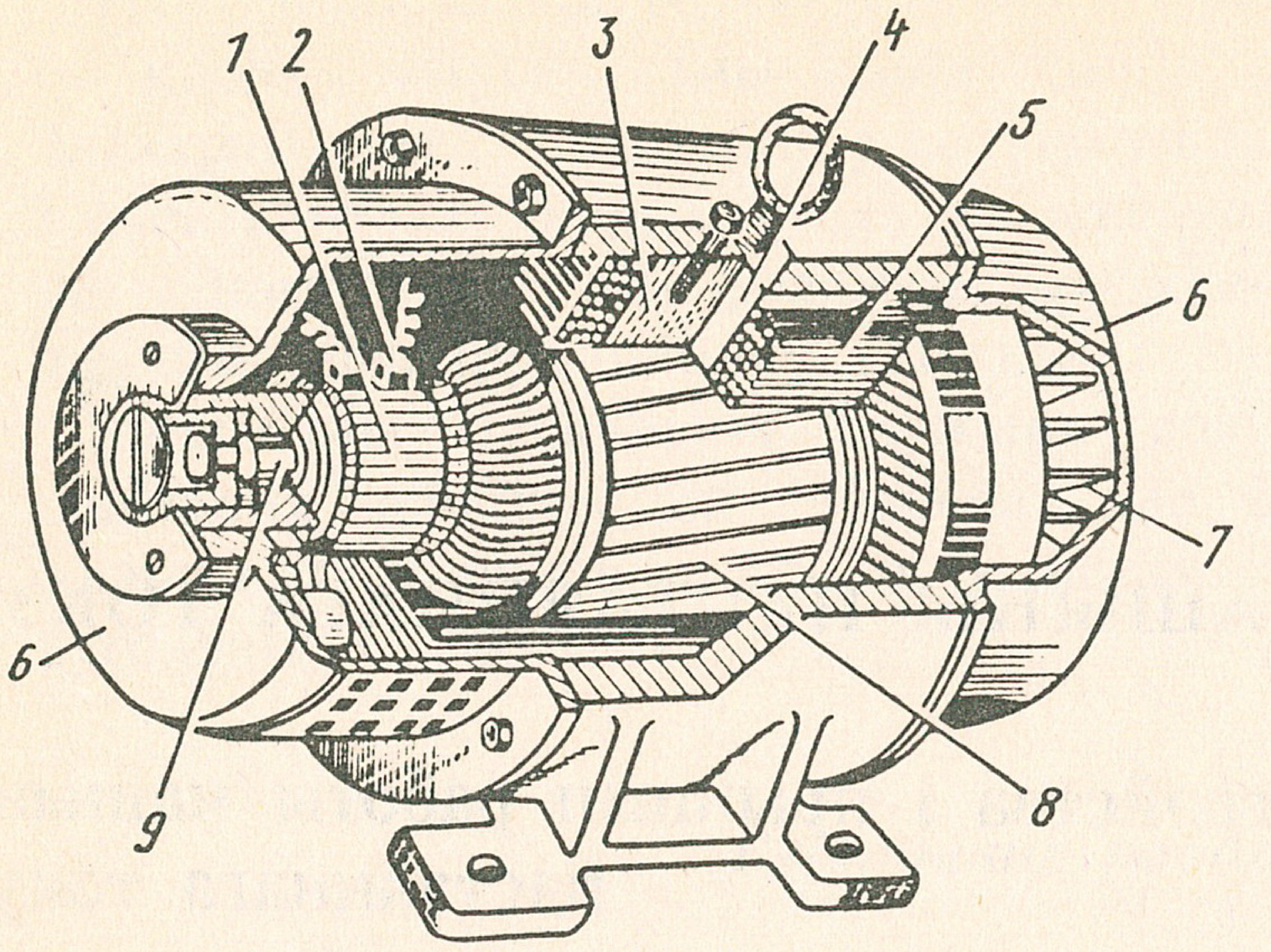
7.1. Устройства і прынцып работы машын пастаяннага току

Генератары і рухавікі пастаяннага току па ўстройству не адрозніваюцца адзін ад другога і складаюцца з наступных частак (рыс. 7.1): статара *4*, якара *8*, калектара *1* і шчотак *2*.

С т а т а р служыць для стварэння магнітнага поля машыны і ўяўляе электрамагніт з яўна выражанымі полюсамі. Электрамагніт складаецца з полюснага стрыжня *3* з наканечнікам і полюснай катушкі *5*. Полюсны наканечнік мае ўвагнутую форму для лепшага ахопу якара і больш плаўнага змянення магнітнай індукцыі па яго акружнасці. Полюсныя катушкі робяцца з меднага ізаляванага праваду, надзяваюцца на полюсныя стрыжні і з'яўляюцца абмоткай узбуджэння машыны. Пры праходжанні пастаяннага току па абмотцы ўзбуджэння статар машыны стварае магутнае магнітнае поле з чаргаваннем полюсаў.

Я к а р у машынах пастаяннага току складаецца са стрыжня і абмоткі. Для змяншэння страты энергіі на віхравыя токі стрыжань якара набіраецца з ізаляваных адзін ад аднаго лістоў электратэхнічнай сталі. У пазы стрыжня ўкладваецца абмотка, якая старанна ізалявана ад стрыжня. У стрыжні маюцца падоўжныя і папярочныя дзіркі, якія служаць для ахалоджвання якара ў час работы. Акрамя гэтага, якар абдуваецца з дапамогай вентыляцыйных лапатачак *7*. Якар мацуецца на стальным валу *9*, які ўстанаўліваецца ў падшыпніках і ўманціраваны ў падшыпнікавыя шчыты *6*. Падшыпнікавыя шчыты мацуюцца балтамі да станіны машыны і служаць апорай для якара. Канцы секцый абмоткі якара з аднаго тарцовага боку прыпайваюцца да калектара.

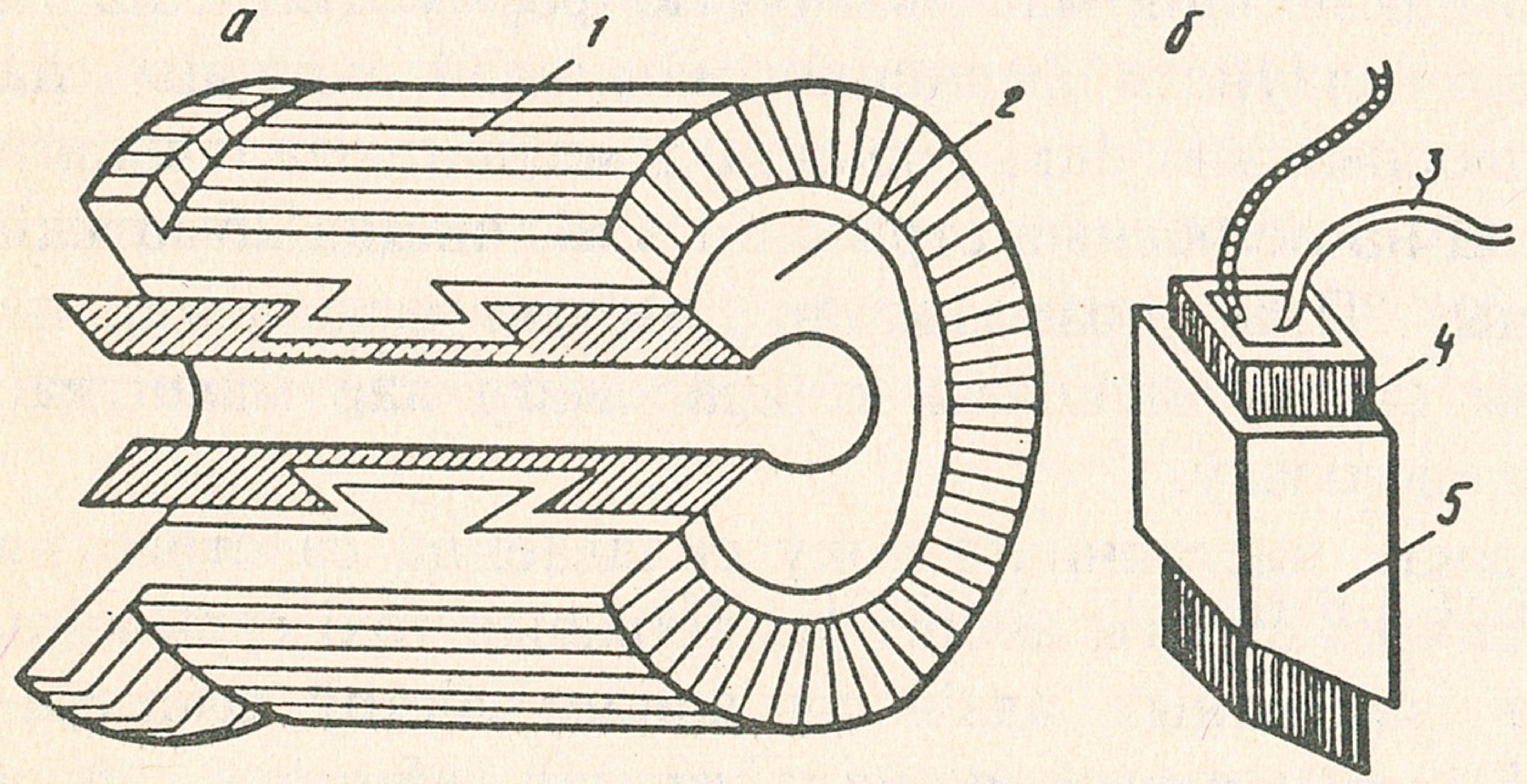
К а л е к т а р (рыс. 7.2) складаецца з медных пласцінак *1* клінападобнага сячэння, якія размешчаны на валу якара і ізаляваны адна ад адной і ад вала міканітам. Пласцінкі мацуюцца



Рыс. 7.1. Машына пастаяннага току

на стальной утулцы *2* з дапамогай націскнога конуса і гайкі. Знешняя паверхня калектара цыліндрычная. Калектар у генератарах служыць для выпрамлення пераменнага току, які ўзбуджаецца ў якары пры вярчэнні яго ў магнітным полі, а ў рухавіках, наадварот, для пераўтварэння пастаяннага току ў пераменны.

Ш ч о т к і прызначаюцца для зняцця напружання з якара або для падачы току ў якар машыны і робяцца яны ў выглядзе прамавугольных брускоў з медных і графітавых парашкоў *4*. Шчоткі размяшчаюцца ў спецыяльных трымальніках *5* і маюць слізгаючы кантакт з пласцінкамі калектара.



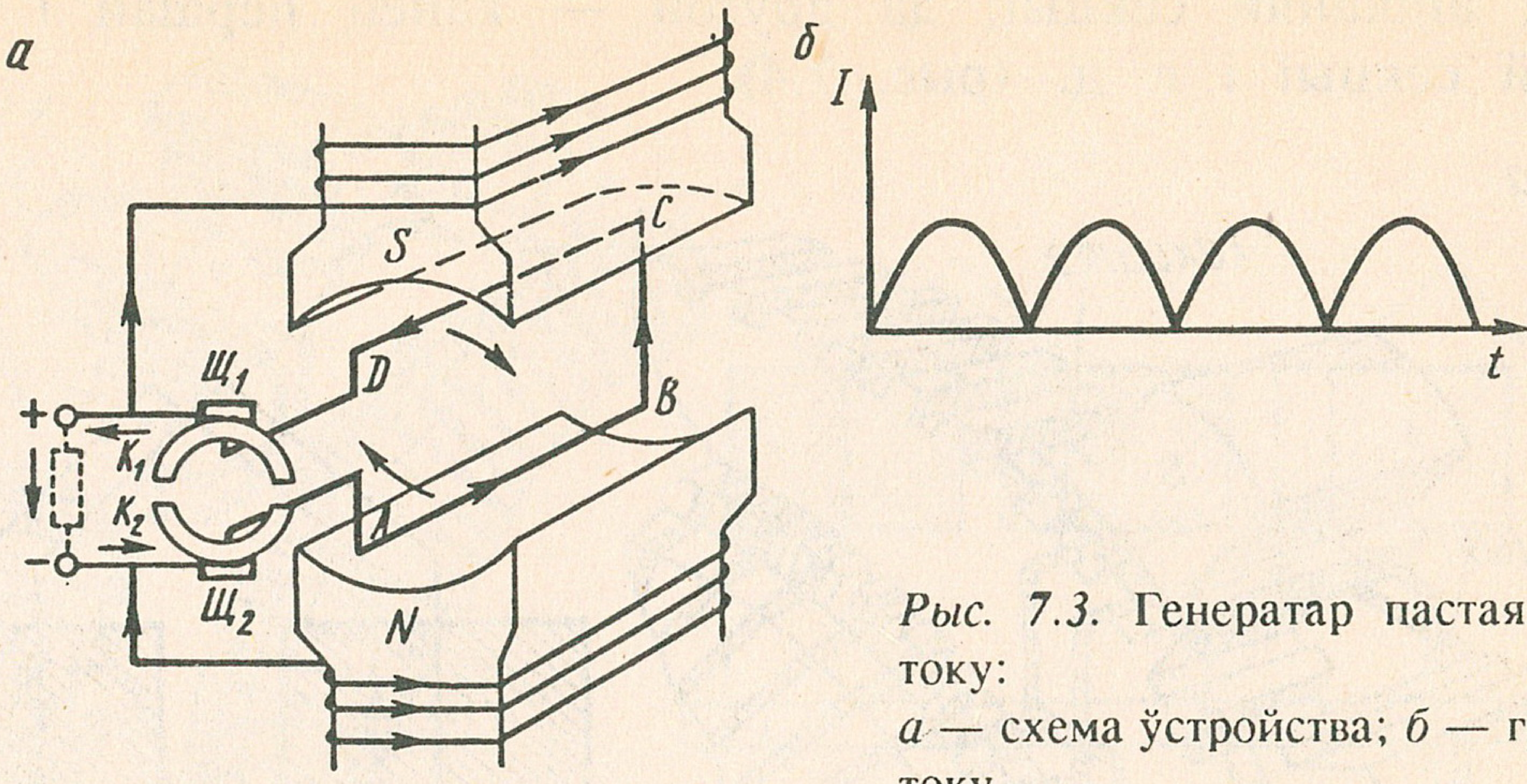
Рыс. 7.2. Калектар (*а*), шчотка (*б*)

Спружына *3* шчоткатрымальніка забяспечвае неабходны кантакт шчоткі з калектарам.

Канцы абмоткі ўзбуджэння і якарнай абмоткі мацуюцца да клем у каробцы вывадаў машыны.

Прынцыповая схема генератара пастаяннага току паказана на рыс. 7.3, *а*. На схеме электрамагніт *NS* з'яўляецца статарам, рамка *ABCD* — якарам, а два паўкольцы K_1 і K_2 — калектарам. Шчоткі абазначаны літарамі $Ш_1$ і $Ш_2$.

У аснову работы генератара пакладзены закон электрамагнітнай індукцыі. Пры вярчэнні рамкі *ABCD* у магнітным полі ў ёй будзе індуцыравацца пераменная ЭРС. Сапраўды, калі праваднік *AB*



Рыс. 7.3. Генератар пастаяннага току:
а — схема ўстройства; *б* — графік току

рухаецца каля паўночнага полюса статара, то ў ім індуцыруецца ЭРС, накіраванне якой вызначаецца па правілу правай рукі ад *A* да *B*. Пры перамяшчэнні праваднiка *AB* каля паўднёвага полюса статара ў ім індуцыруецца ЭРС у напрамку ад *B* да *A*. Аналагічна можна сказаць пра частку рамкі *CD*. У знешнім ланцугу ў першым і другім выпадках ток будзе праходзіць ад шчоткі $Щ_1$ да шчоткі $Щ_2$. Такім чынам, пры вярчэнні рамкі праз нагрузачнае супраціўленне знешняга ланцуга праходзіць ток, пастаянны па напрамку, але пераменлівы па значэнні, пульсуючы ток (рыс. 7.3, *б*).

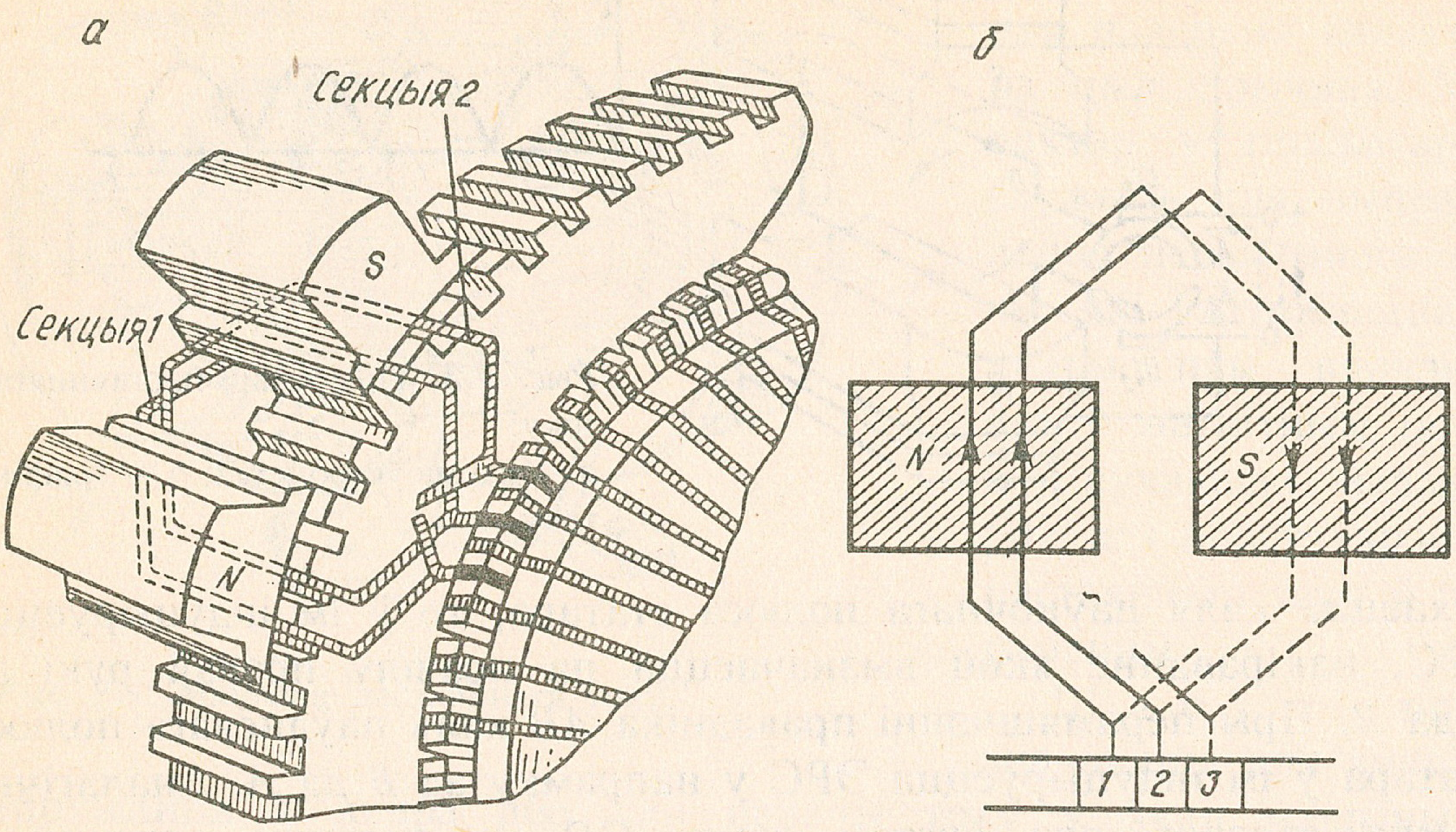
Для згладжвання пульсацый у генератарах пастаяннага току якарная абмотка складаецца з шэрага аднолькавых шматвітковых секцый (рамак), а калектар складаецца з вялікага ліку пласцінак.

Першыя машыны пастаяннага току выпускаліся з к а л ь ц а в о й а б м о т к а й я к а р а. Стрыжань якара ўяўляў сабой полы цыліндр, замацаваны на валу, а праваднік абмоткі якара абхопліваў стрыжань з унутранага і знешняга бакоў. У праваднiках, якія знаходзяцца на паверхні стрыжня якара, узбуджаецца ЭРС. Гэта частка абмоткі якара называецца *актыўнай*. У праваднiках, якія знаходзяцца ўнутры стрыжня і на тарцавых частках абмоткі, ЭРС не ўзбуджаецца, гэтыя неактыўныя праваднікі складаюць вялікую частку абмоткі, што абумоўлівае бескарысны расход медзі.

Для ўстаранення гэтага недахопу П.М. Сталетавым была прапанавана б а р а б а н н а я а б м о т к а я к а р а. Пры такой абмотцы провад размяшчаўся ў пазах на паверхні стрыжня якара ў выглядзе асобных секцый. Барабанная абмотка можа быць петлявой або хвалевай.

Пры п е т л я в о й а б м о т ц ы пачатак і канец адной секцыі абмоткі прыпайваюцца да дзвюх суседніх пласцінак калектара: да першай пласцінкі прыпайваецца пачатак першай і

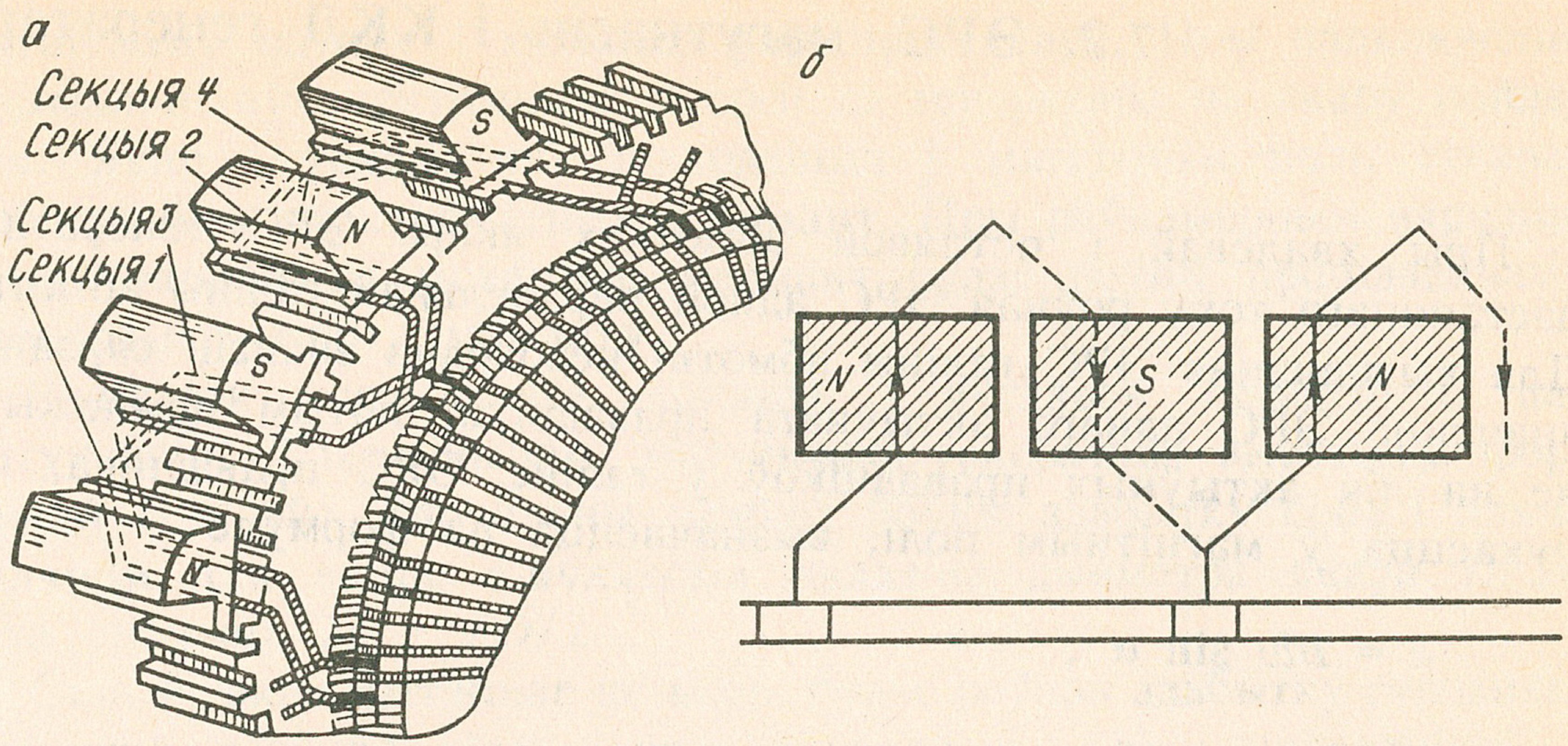
канец апошняй секцыі; да другой — канец першай і пачатак другой секцыі і г. д. (рыс. 7.4).



Рыс. 7.4. Петлявая абмотка якара:
а — укладка секцый петлявой абмоткі ў пазы стрыжня якара; *б* — секцыя абмоткі

Такім чынам, усе секцыі абмоткі злучаюцца паслядоўна і ўяўляюць сабой замкнуты ланцуг, а лік пласцін калектара роўны ліку секцый абмоткі якара. Секцыі абмоткі ўкладваюцца ў пазы так, што калі адна актыўная частка секцыі знаходзіцца пад паўночным полюсам, то другая павінна знаходзіцца пад паўднёвым полюсам статара. Петлявую абмотку якара называюць яшчэ паралельнай, бо яна раздзяляецца на паралельныя галіны, лік якіх адпавядае ліку полюсаў статара. Секцыі петлявой абмоткі робяцца на шаблонах і ў гатовым выглядзе ўкладваюцца ў адкрытыя пазы стрыжня якара, а канцы секцый прыпайваюцца да пласцін калектара. У якары з закрытымі або паўзакрытымі пазамі абмотка ўкладваецца ўручную. Лік шчотак у генератарах з петлявой абмоткай роўны ліку полюсаў статара. Шчоткі, якія ўстаноўлены насупраць аднолькавых полюсаў, маюць аднолькавую палярнасць, злучаюцца паміж сабой і падключаюцца да клемы генератара. У сучасных машынах пастаяннага току абмотка якара выконваецца двухслойнай. У двухслойнай абмотцы ў кожны паз стрыжня якара ўкладваюцца дзве актыўныя часткі розных секцый, прычым калі адна актыўная частка секцыі ўкладваецца ў паз першай, то другая — у адпаведны паз другой.

Хвалевая абмотка не мае адваротнага ходу праваднiка (рыс. 7.5). Провад абыходзіць паверхню стрыжня якара



Рыс. 7.5. Хвалевая абмотка якара:
а — укладка секцый хвалевай абмоткі ў пазы стрыжня якара;
б — схема хвалевай абмоткі

ў адным напрамку, пакуль не запоўніць усе пазы. Да кожнай пласцінкі калектара падключаецца канец папярэдняй секцыі і пачатак наступнай, і ўся абмотка ўяўляе замкнуты ланцуг. У выпадку хвалевай абмоткі пры любой колькасці пар полюсаў статара якарная абмотка ўяўляе паралельны ланцуг з дзвюх галін. У машынах вялікай магутнасці прымяняюць паралельна-паслядоўную абмотку, камбінацыю простай петлявой і многахадовай хвалевай абмотак.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх асноўных частак складаецца машына пастаяннага току?
2. Як устроены статар, якар, калектар і шчоткі? Для чаго яны прызначаюцца?
3. Які ток узбуджаецца ў якары гнератара пастаяннага току? Які ток праходзіць па нагрузцы?
4. Якія тыпы якарных абмотак прымяняюцца ў машынах пастаннага току?
5. Як робіцца петлявая абмотка якара генератара пастаяннага току?
6. Як робіцца хвалевая абмотка якара генератара пастаяннага току?
7. Чаму петлявую абмотку якара генератара пастаяннага току называюць паралельнай? Колькі паралельных галін мае якарная абмотка чатырохполюснага генератара?
8. Колькі паралельных галін мае якарная абмотка генератара пры хвалевай намотцы?

7.2. ЭРС, магутнасць і ККД генератара

Пры хвалевай і петлявой абмотках якара ЭРС генератара пастаяннага току роўная ЭРС адной паралельнай галіны абмоткі. Для вызначэння ЭРС галіны абмоткі неабходна знайсці сярэдняе значэнне ЭРС аднаго актыўнага праваднiка, потым памножыць яе на лік актыўных праваднікоў у галіне. ЭРС праваднiка, які рухаецца ў магнітным полі, вызначаецца па формуле

$$e = Blv \sin \alpha ,$$

дзе B — магнітная індукцыя; l — даўжыня праваднiка; v — лінейная хуткасць праваднiка; α — вугал паміж напрамкамі магнітных сілавых ліній і хуткасці руху праваднiка.

Для атрымання сярэдняга значэння ЭРС аднаго праваднiка трэба вызначыць сярэдняе значэнне магнітнай індукцыі ў паветраным зазоры на полюсным дзяленні τ:

$$B_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B\,dx .$$

Значыць, $E_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} lv$, паколькі ў зазоры генератара $\alpha = 90°$. Магнітны паток аднаго полюса статара $\Phi_0 = B_{\text{ср}} l\tau$. Адсюль $B_{\text{ср}} = \Phi_0 / (l\tau)$ і формула прыме выгляд

$$E_{cp} = \Phi_0 l\, v \,/\, (l\, \tau) = (v/\tau)\, \Phi_0 . \quad (7.1)$$

Падставім ў формулу (7.1) $v = \pi Dn$ і $\tau = \pi D/(2p)$, атрымаем

$$E_{\text{ср}} = 2pn\Phi_0.$$

У генератарах з лікам праваднікоў N у якары будзе $N/(2a)$ праваднікоў, якія злучаны паслядоўна ў адной галіне (a — лік пар паралельных галін у абмотцы якара).

Такім чынам, ЭРС генератара выразіцца формулай:

$$E = E_{\text{ср}} N/(2a) = (pnN/a)\Phi_0 .$$

Абазначым пастаянныя велічыні p, N, a для дадзенага генератара праз k, атрымаем

$$E = kn\Phi_0 . \quad (7.2)$$

Значыць, ЭРС генератара пастаяннага току прапарцыйна магнітнаму патоку і хуткасці вярчэння якара. Пры падключэнні прымальнікаў электрычнай энергіі да генератара па якару пойдзе ток. Якар з токам, які знаходзіцца ў магнітным полі, стварае процідзейны электрамагнітны момант. Пры раўнамерным вярчэнні якара вярчальны механічны момант будзе роўны процідзейнаму электрамагнітнаму моманту.

Здабытак вярчальнага моманту і вуглавой хуткасці ω дае магутнасць. Такім чынам, магутнасць генератара выразіцца формулай $P = M\omega$. Вярчальны момант роўны здабытку сілы і пляча (плячом для якара з'яўляецца палавіна дыяметра якара $D/2$), гэта значыць $M = FD/2$.

Сіла F, якая дзейнічае на якар, будзе роўная здабытку сярэдняга значэння дзейнай сілы аднаго праваднiка і ліку праваднікоў у якары, што можна выразіць формулай $F = F_{ср}N$. Сярэдняе значэнне сілы, якая дзейнічае на праваднік з токам у магнітным полі, роўнае здабытку сярэдняга значэння магнітнай індукцыі $B_{ср}$, даўжыні праваднiка l і току ў ім $I (F_{ср} = B_{ср}lI)$. Ток у асобным праваднiку $I = I_я/(2a)$. Такім чынам, формула вярчальнага моманту якара пасля падстаноўкі значэння F прымае выгляд

$$M = B_{ср}\, l \frac{I_я}{2a} N \frac{D}{2} . \qquad (7.3)$$

Выразім $B_{ср}$ з папярэдніх формул праз другія велічыні:

$$B_{ср} = \frac{F_{ср}}{l\,v} = 2pn\Phi_0/(l\,v) = 2p\Phi_0/(\pi Dl) .$$

Падставім гэта значэнне ў формулу (7.3), атрымаем

$$M = (pN/2\pi a)\Phi_0 I_я = k\Phi_0 I_я .$$

Значыць, формула электрамагнітнай магутнасці будзе мець выгляд

$$P = M\omega = (pN/2\,\pi a)\Phi_0 I_я 2\pi n = (pn\frac{N}{a})\Phi_0 I_я .$$

Абазначым $(pn\ N/a)\Phi_0$ праз E, атрымаем $P = EI_я$. Значыць, электрамагнітная магутнасць генератара роўная здабытку ЭРС генератара і току ў якары.

ККД генератара вызначаецца стасункам знімаемай карыснай магутнасці P_2 да ўсёй падведзенай магутнасці P_1:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ або } \eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{мех} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{м} + \Delta P_{ш}},$$

дзе P_2 — магутнасць, якая аддаецца ў знешні ланцуг; $\Delta P_{мех}$ — механічныя страты магутнасці; $\Delta P_{ст}$ — страты магутнасці ў сталі; $\Delta P_{м}$ — страты магутнасці ў медзі; $\Delta P_{ш}$ — страты магутнасці ў шчотачных кантактах.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Ад чаго залежыць ЭРС генератара пастаяннага току?

2. Ці залежыць ЭРС генератара пастаяннага току ад кольцасці пар полюсаў статара пры петлявой абмотцы якара? Пры хвалевай абмотцы якара?

3. Як растлумачыць на падставе правіла левай рукі стварэнне процідзейнага электрамагнітнага моманту?

4. Ад чаго залежыць электрамагнітная магутнасць генератара пастаяннага току?

5. Якар чатырохполюснага генератара пастаяннага току верціцца з частатой $n = 25$ аб/с. Чаму роўная ЭРС генератара, калі магнітны паток полюса $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ Вб, а стасунак ліку актыўных праваднікоў абмоткі якара да ліку пар паралельных галін $N/a = 200$.

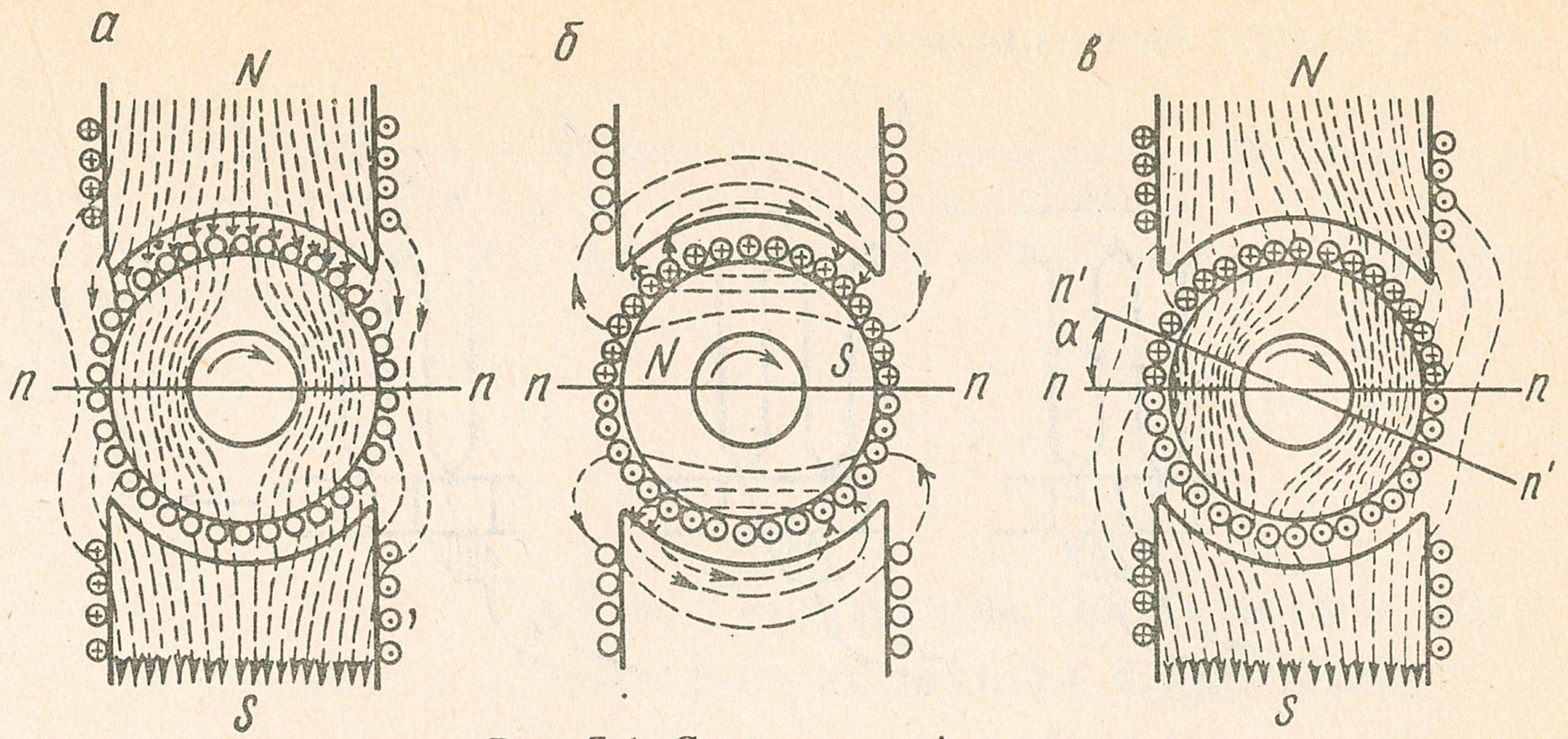
Адказ: $E = 200$ В.

6. Генератар пастаяннага току мае ЭРС $E = 240$ В, адну пару полюсаў $p = 1$, якарную абмотку з дзвюх галін $a = 1$, магнітны паток $\Phi_0 = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ Вб. Вызначыць лік актыўных праваднікоў, калі частата вярчэння якара $n = 40$ аб/с.

Адказ: $N = 400$ праваднікоў.

7.3. Рэакцыя якара. Камутацыя

Пры падключэнні нагрузкі да генератара пастаяннага току па абмотцы якара пойдзе ток. Гэты ток стварае магнітнае поле, якое ўздзейнічае на магнітнае поле статара. Уздзеянне магнітнага поля якара на магнітнае поле статара называецца *рэакцыяй якара*. Пры халастым ходзе генератара, калі знешні ланцуг разамкнуты і ў якары няма току, магнітнае поле машыны вызначаецца магнітным полем галоўных полюсаў статара (рыс. 7.6, *а*). Пры праходжанні току па абмотках якара магнітнае поле якара будзе мець выгляд, паказаны на рыс. 7.6, *б* (*пп* — геаметрычная нейтральная лінія).

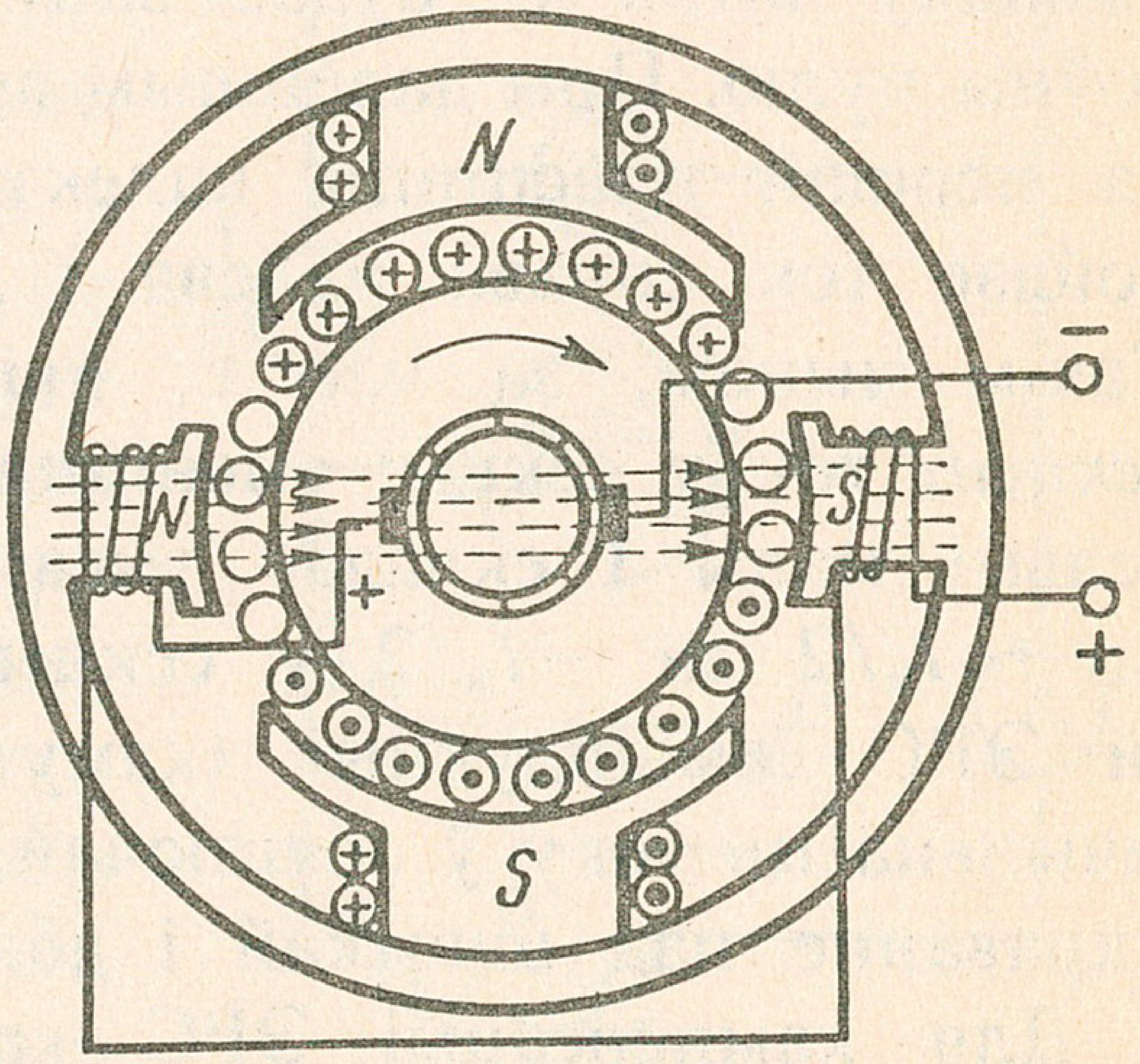


Рыс. 7.6. Схема рэакцыі якара:
а — магнітнае поле статара; *б* — магнітнае поле якара; *в* — выніковае магнітнае поле

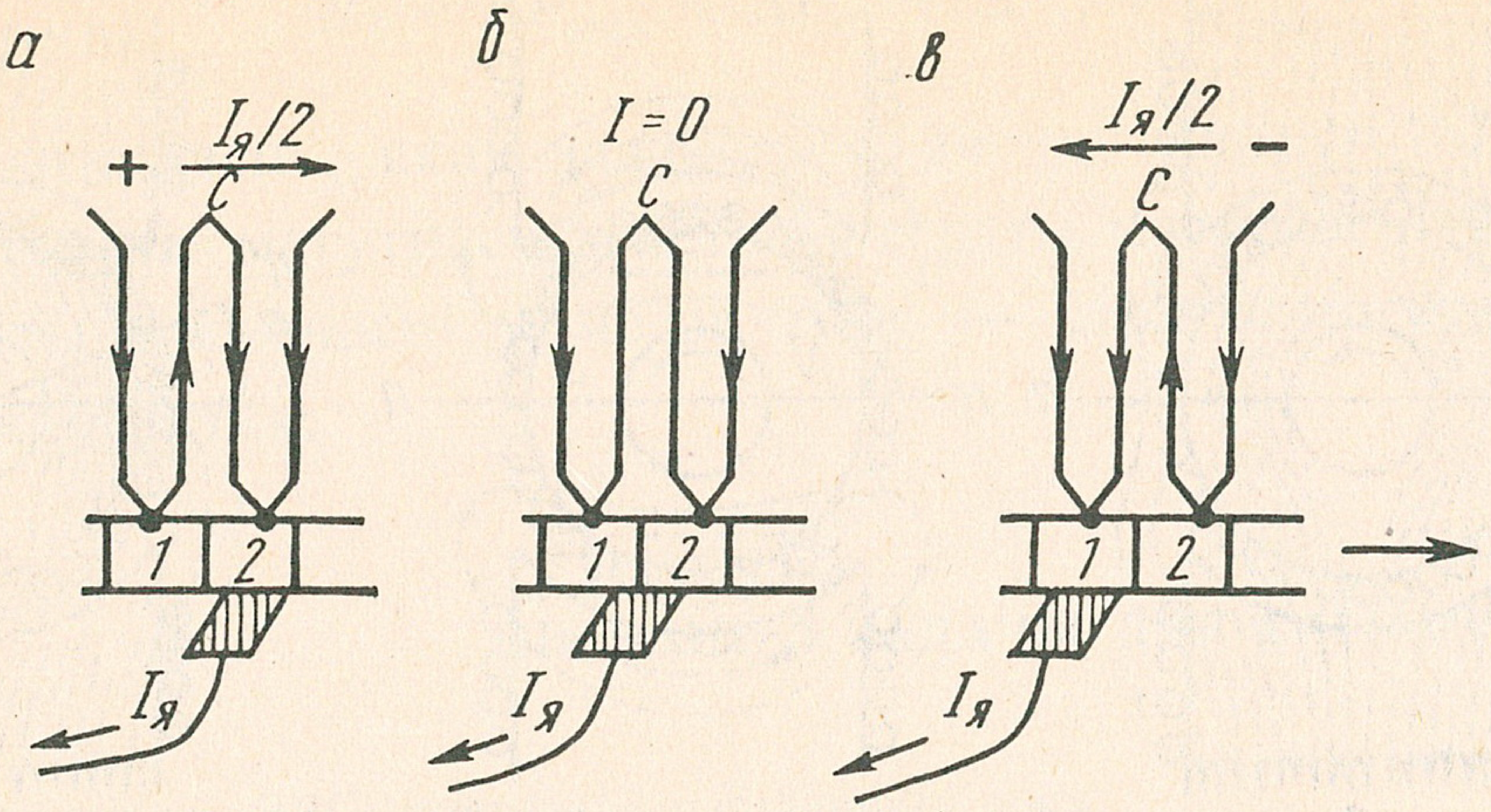
Пры рабоце генератара магнітнае поле якара і магнітнае поле статара накладваюцца адно на другое і даюць выніковае магнітнае поле (рыс. 7.6, *в*). У правай частцы паўночнага і ў левай частцы паўднёвага полюсаў статара густата сілавых ліній магнітнага поля павялічваецца, бо на гэтых участках магнітныя палі якара і статара суміруюцца. У левай частцы паўночнага і правай частцы паўднёвага полюсаў выніковае магнітнае поле паслабляецца. Пры гэтым фізічная нейтраль $n' n'$ генератара павернецца па ходу вярчэння якара на некаторы вугал α. Паварот фізічнай нейтралі прыводзіць да памяншэння ЭРС генератара і іскравання шчотак.

Рэакцыя якара залежыць ад значэння току ў абмотцы якара, гэта значыць ад нагрузкі генератара. Каб пазбегнуць іскравання шчотак, неабходна пры павароце нейтральнай лініі паварочваць і шчоткі на калектары па ходу вярчэння якара.

Для ўстаранення рэакцыі якара паміж галоўнымі полюсамі статара змяшчаюцца дадатковыя полюсы (рыс. 7.7). Абмоткі дадатковых полюсаў паслядоўна злучаюцца з абмоткай якара. Таму павелічэнне току ў якары прыводзіць да павелічэння току ў абмотках дадатковых полюсаў. Магнітныя палі дадатковых полюсаў і току ў абмотцы якара маюць процілеглыя напрамкі, чым і забяспечваюць



Рыс. 7.7. Схема ўключэння абмоткі дадатковых полюсаў



Рыс. 7.8. Схема камутацыі машыны пастаяннага току

кампенсацыю магнітнага поля якара. На схеме абмотка дадатковых полюсаў абазначаецца літарай *D*.

Камутацыяй у машынах пастаяннага току называецца працэс змянення току ў секцыях абмоткі якара пры пераключэнні іх з адной паралельнай галіны ў другую. Прадставім кожную секцыю якарнай абмоткі ў выглядзе аднаго вітка, а калектар — у выглядзе прамавугольных пласцін *1, 2* (рыс. 7.8, *а*). Пры дакрананні шчоткай калектарнай пласцінкі *2* праз віток секцыі *C* пойдзе ток у кірунку злева направа, роўны палавіне току якара ($I_я/2$). Пры вярчэнні якара па ходу гадзіннікавай стрэлкі шчотка з другой пласцінкі калектара перамясціцца на першую і г. д.

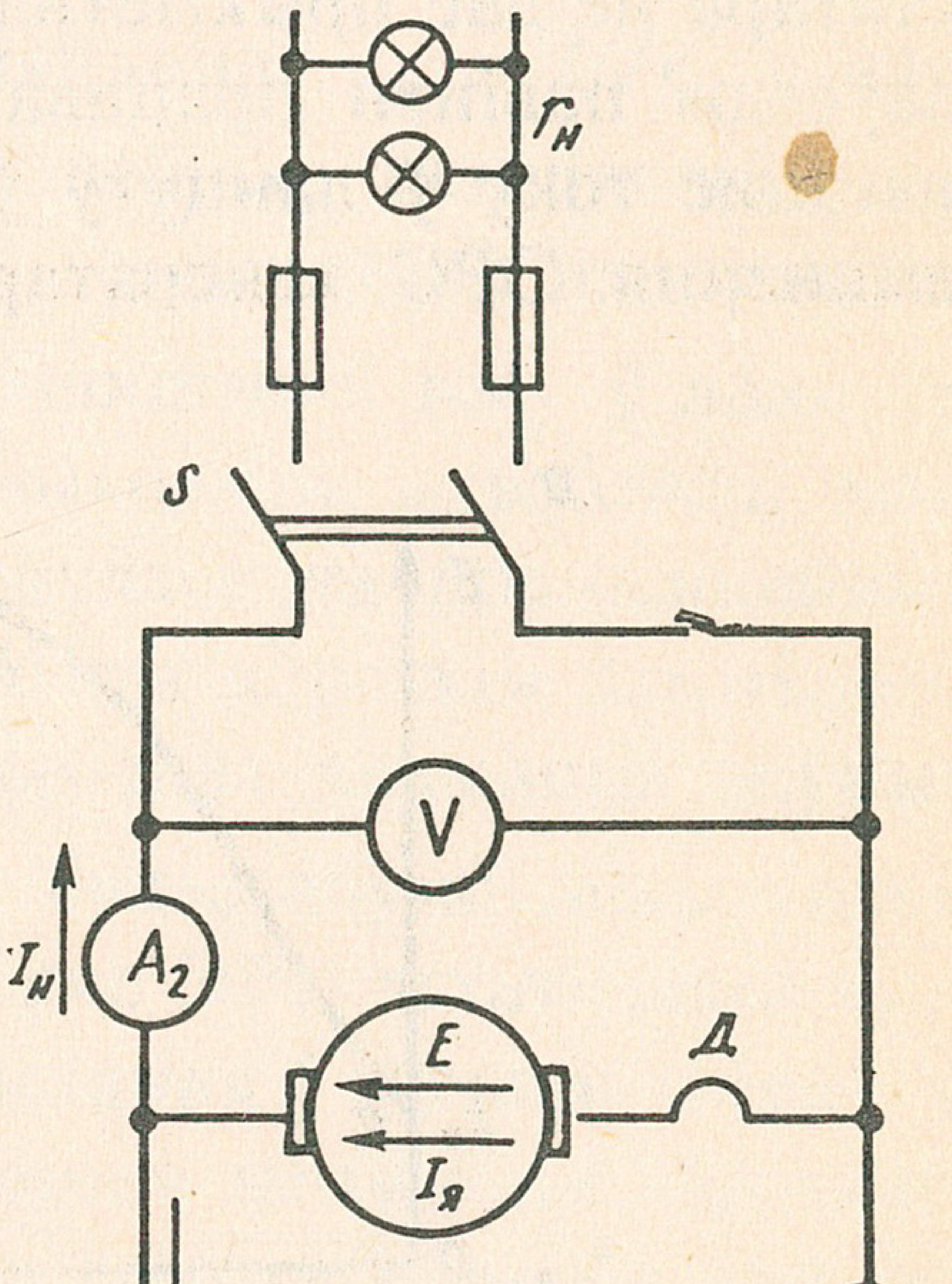
Разгледзім выпадак, калі шчотка ў аднолькавай меры дакранаецца да абедзвюх пласцінак калектара (рыс. 7.8, *б*). У гэтым выпадку віток *C* будзе замкнуты накаротка і ток у ім будзе роўны нулю. Пры далейшым вярчэнні якара, калі шчотка апыніцца на першай пласцінцы калектара (рыс. 7.8, *в*), па вітку секцыі пойдзе ток справа налева і роўны палавіне току якара ($I_я/2$). Такім чынам, за час τ, які называецца *перыядам камутацыі секцыі*, ток у секцыі зменіцца ад $+I_я/2$ да $-I_я/2$. Час камутацыі вельмі малы і складае тысячныя долі секунды. Змяненне току ад $+I_я/2$ да $-I_я/2$ у секцыі за вельмі кароткі час стварае ў ёй ЭРС самаіндукцыі (камутацыі). ЭРС камутацыі павялічвае шчыльнасць току ў збягаючай пласцінцы калектара, што выклікае іскраванне пад шчоткай і абгаранне калектара.

Для кампенсацыі ЭРС камутацыі ў генератарах неабходна зрушыць шчоткі ў бок вярчэння якара на некаторы вугал α у залежнасці ад нагрузкі генератара. У рухавіках шчоткі зрушваюцца ў бок, процілеглы напрамку вярчэння якара.

1. Што называецца рэакцыяй якара? Ад чаго яна залежыць? Як устараняецца?
2. Да чаго прыводзіць камутацыя секцый якарнай абмоткі?
3. Як устараняецца камутацыя ў генератарах пастаяннага току? У рухавіках пастаяннага току?

7.4. Генератары пастаяннага току і іх асноўныя характарыстыкі

Генератары пастаяннага току бываюць з незалежным узбуджэннем і з самаўзбуджэннем. У генератарах з незалежным узбуджэннем абмотка статара сілкуецца ад пабочнай крыніцы пастаяннага току: акумулятарнай батарэі або генератара пастаяннага току. Шырокае прымяненне ў практыцы атрымалі генератары з самаўзбуджэннем. У залежнасці ад схемы ўключэння абмоткі ўзбуджэння яны падзяляюцца на генератары з паралельным, паслядоўным і змешаным узбуджэннем. У генератарах з паралельным узбуджэннем (рыс. 7.9) абмотка ўзбуджэння мае вялікі лік віткоў і падключаецца паралельна абмотцы якара. На схеме яна абазначаецца літарай *Ш* (што азначае шунтавая). Сілкаванне абмоткі ўзбуджэння пастаянным токам ажыццяўляецца ад самога генератара. Ток якара ў генератарах з паралельным узбуджэннем роўны суме току ў знешнім ланцугу $I_н$ і ў ланцугу ўзбуджэння $I_у$: $I_я = I_н + I_у$. Ток у ланцугу ўзбуджэння складае 3—5 % току якара.



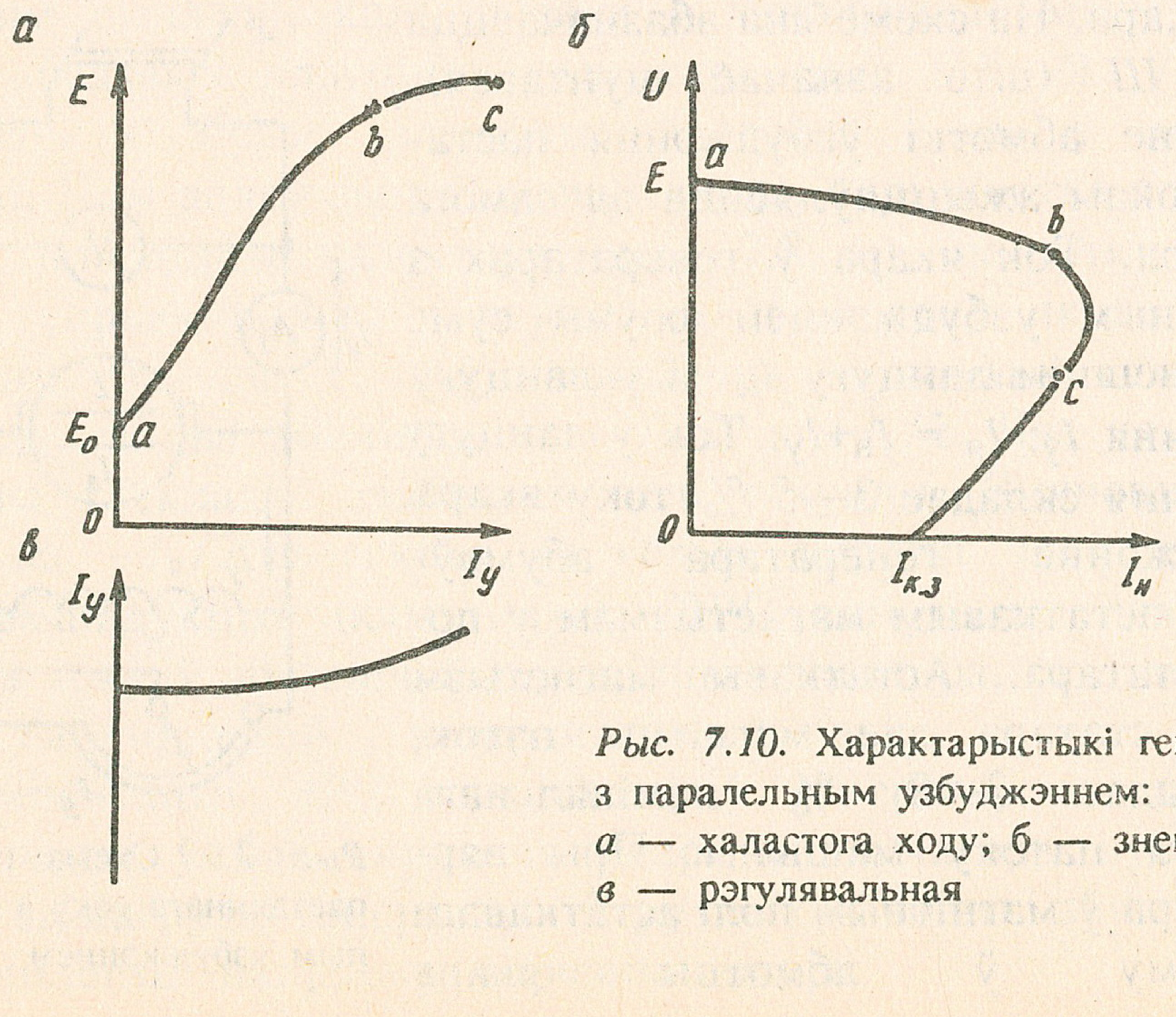
Рыс. 7.9. Схема генератара пастаяннага току з паралельным узбуджэннем

Узбуджэнне генератара абумоўліваецца астаткавым магнетызмам у полюсах статара. Астаткавы магнетызм полюсаў статара дае магнітны паток, які складае 3—8 % намінальнага магнітнага патоку машыны. Пры вярчэнні якара ў магнітным полі астаткавага магнетызму ў абмотцы якара

ўзбуджаецца ЭРС індукцыі, якая стварае ток у абмотцы ўзбуджэння. Ток, створаны ЭРС астаткавага магнетызму, узмацняе магнітнае поле статара. Узмацненне магнітнага поля статара прыводзіць да павелічэння ЭРС якара, а ЭРС якара ў сваю чаргу прыводзіць да павелічэння току ў абмотцы ўзбуджэння і даводзіць статар да поўнага магнітнага насычэння. Узбуджэнне генератара да намінальнай ЭРС ажыццяўляецца ў рэжыме халастога ходу.

Якасць генератара вызначаецца яго характарыстыкамі, якія паказваюць залежнасць паміж асноўнымі электрычнымі велічынямі: токам нагрузкі $I_н$, напружаннем на полюсах машыны $U_н$, токам узбуджэння $I_у$.

Характарыстыка халастога ходу (рыс. 7.10, *а*) — гэта графічны выраз залежнасці ЭРС генератара ад току ўзбуджэння: $E = f(I_у)$ пры адключаным знешнім ланцугу ($I_н = 0$). Пры адсутнасці току ў абмотках узбуджэння ($I_у = 0$) ЭРС генератара абумоўліваецца магнітным полем астаткавага магнетызму статара, што паказана адрэзкам OE_0. Павелічэнне току ў абмотках узбуджэння выклікае павелічэнне магнітнага патоку статара, што прыводзіць да росту ЭРС генератара (участак *ab*). Далейшае павелічэнне току ў абмотках прыводзіць да магнітнага насычэння і запаволенага росту ЭРС генератара, што адпавядае на графіку участку *bc*. Пры магнітным насычэнні павелічэнне току ў абмотках статара не дае прыкметнага павелічэння ЭРС генератара. Генератар заўсёды павінен працаваць у вобласці насычэння, тады невялікае ваганне току ў ланцугу ўзбуджэння не прыводзіць да прыкметнага змянення ЭРС генератара.



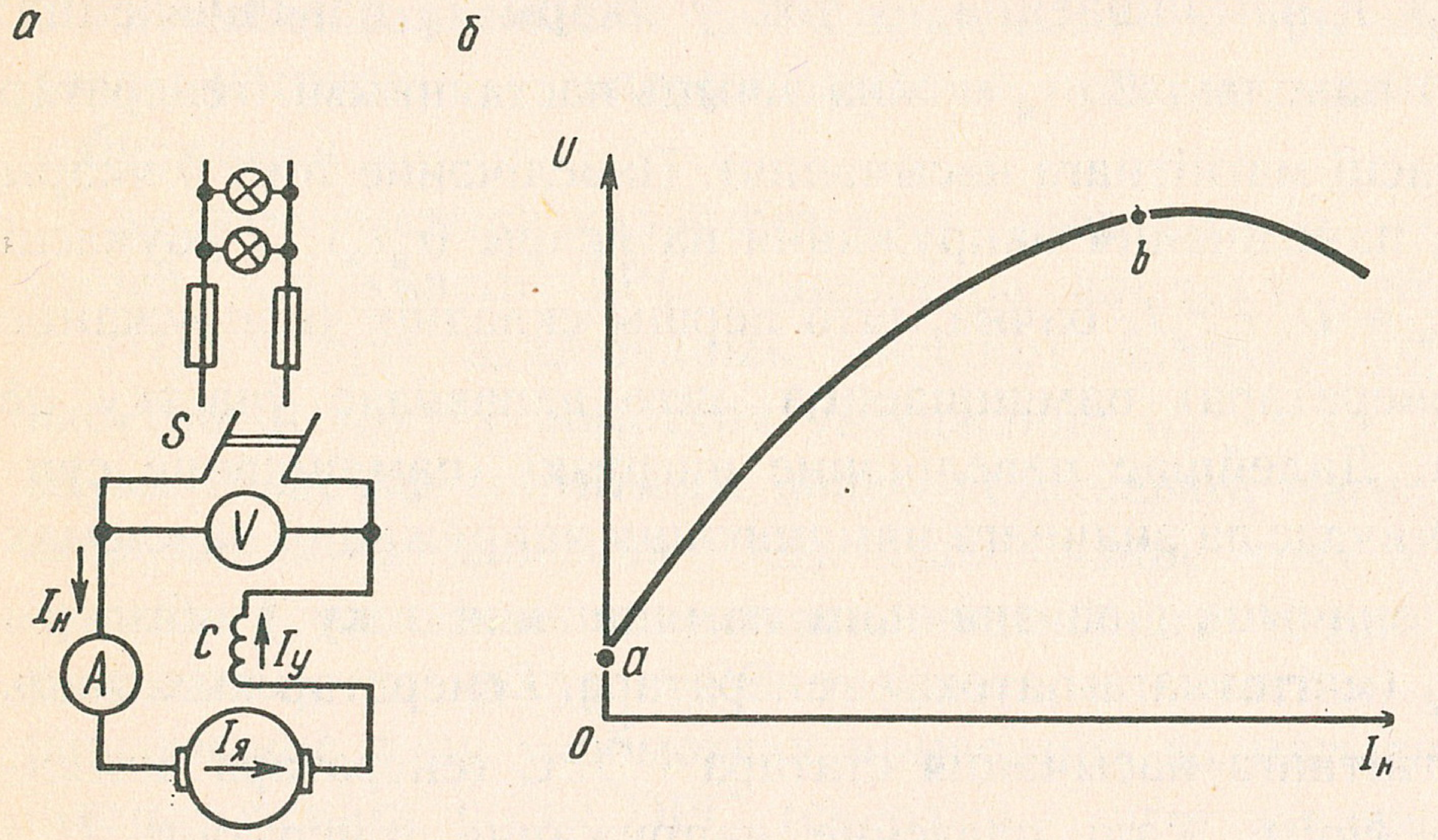
Рыс. 7.10. Характарыстыкі генератара з паралельным узбуджэннем:
а — халастога ходу; б — знешняя;
в — рэгулявальная

Знешняя характарыстыка генератара (рыс. 7.10, *б*) — гэта графічны выраз залежнасці напружання на клемах генератара ад току нагрузкі: $U = f(I_н)$ пры пастаянным супраціўленні ланцуга ўзбуджэння ($r_у$= const). У генератарах з паралельным узбуджэннем супраціўленні нагрузкі $r_н$ і абмоткі ўзбуджэння $r_у$ злучаюцца паралельна і ўяўляюць супраціўленне знешняга ланцуга генератара: $r = r_н r_у / (r_н + r_у)$. Пры павелічэнні нагрузкі (памяншэнні супраціўлення $r_н$) r памяншаецца, а ток у якары $I_я$ павялічваецца: $I_я = E/(r + r_я)$ паколькі E і $r_я$ можна лічыць пастаяннымі (генератар працуе ў вобласці магнітнага насычэння). Павелічэнне току ў якары прыводзіць да павелічэння напружання на якары ($r_я I_я$). З роўнасці $E = rI_я + r_я I_я = U + r_я I_я$ бачна, што першы складнік (напружанне на клемах генератара) памяншаецца, што адпавядае ўчастку *ab* (рыс. 7.10, *б*). Далейшае павелічэнне нагрузкі (памяншэнне супраціўлення $r_н$) вядзе да значнага памяншэння напружання на клемах генератара, а значыць і да значнага памяншэння току ў абмотцы ўзбуджэння $I_у$ (магнітнага патока) генератара. Генератар выходзіць з вобласці магнітнага насычэння статара і ЭРС генератара памяншаецца ($E = kn\Phi$). Калі падзенне напружання генератара U і памяншэнне супраціўлення нагрузкі $r_н$ адбываецца ў аднолькавай ступені, то ток у ланцугу не будзе мяняцца: $I_н = U/r_н$, што адпавядае участку *bc* (рыс. 7.10, *б*). Далейшае памяншэнне супраціўлення нагрузкі $r_н$ вядзе да рэзкага памяншэння напружання на клемах генератара, а значыць, і да памяншэння току ў ланцугу. Гэта тлумачыцца тым, што генератар выходзіць з вобласці магнітнага насычэння і змяненне ЭРС апынулася на прамалінейным участку характарыстыкі халастога ходу. Пры кароткім замыканні, калі $r_н = 0$, напружанне на клемах генератара акажацца роўным нулю. Магнітны паток у гэтым выпадку будзе абумоўлены толькі астаткавым магнетызмам, а ў якары ўзнікне ЭРС астаткавага магнетызму, якая і стварае ток кароткага замыкання ў знешнім ланцугу. Таму генератары з паралельным узбуджэннем не баяцца кароткага замыкання. Пры кароткім замыканні яны самі сябе як бы выключаюць з аварыйнага рэжыму.

Рэгулявальная характарыстыка генератара (рыс. 7.10, *в*) — гэта графічны выраз залежнасці току ўзбуджэння ад току нагрузкі $I_у = f(I_н)$ пры захаванні пастаяннага напружання на клемах генератара (U = const). Са знешняй характарыстыкі генератара (рыс. 7.10, *б*) бачна, што пры павелічэнні нагрузкі напружанне на клемах генератара падае. Для захавання напружання паста-

янным неабходна павялічыць ЭРС генератара пры нязменнай хуткасці вярчэння якара. Гэта можна ажыццявіць шляхам павелічэння току ў ланцугу ўзбуджэння. Значыць, для захавання пастаяннага напружання на клемах машыны пры павелічэнні нагрузачнага току неабходна павялічваць ток у абмотцы ўзбуджэння.

У генератарах з паслядоўным узбуджэннем (рыс. 7.11, *а*) абмотка ўзбуджэння



Рыс. 7.11. Генератар з паслядоўным узбуджэннем: *а* — схема; *б* — знешняя характарыстыка

ўключаецца паслядоўна з якарнай абмоткай і ток якара праходзіць праз абмотку ўзбуджэння і знешні ланцуг ($I_я = I_у = I_н$). Абмотка паслядоўнага ўзбуджэння мае невялікую колькасць віткоў тоўстага праваду. На схемах яна абазначаецца літарай *С*. Характарыстыка халастога ходу генератара з паслядоўным узбуджэннем уяўляе пункт на восі ардынат, бо пры незамкнутым знешнім ланцугу ток у абмотцы ўзбуджэння роўны нулю і ЭРС будзе абумоўлівацца толькі астаткавым магнетызмам статара.

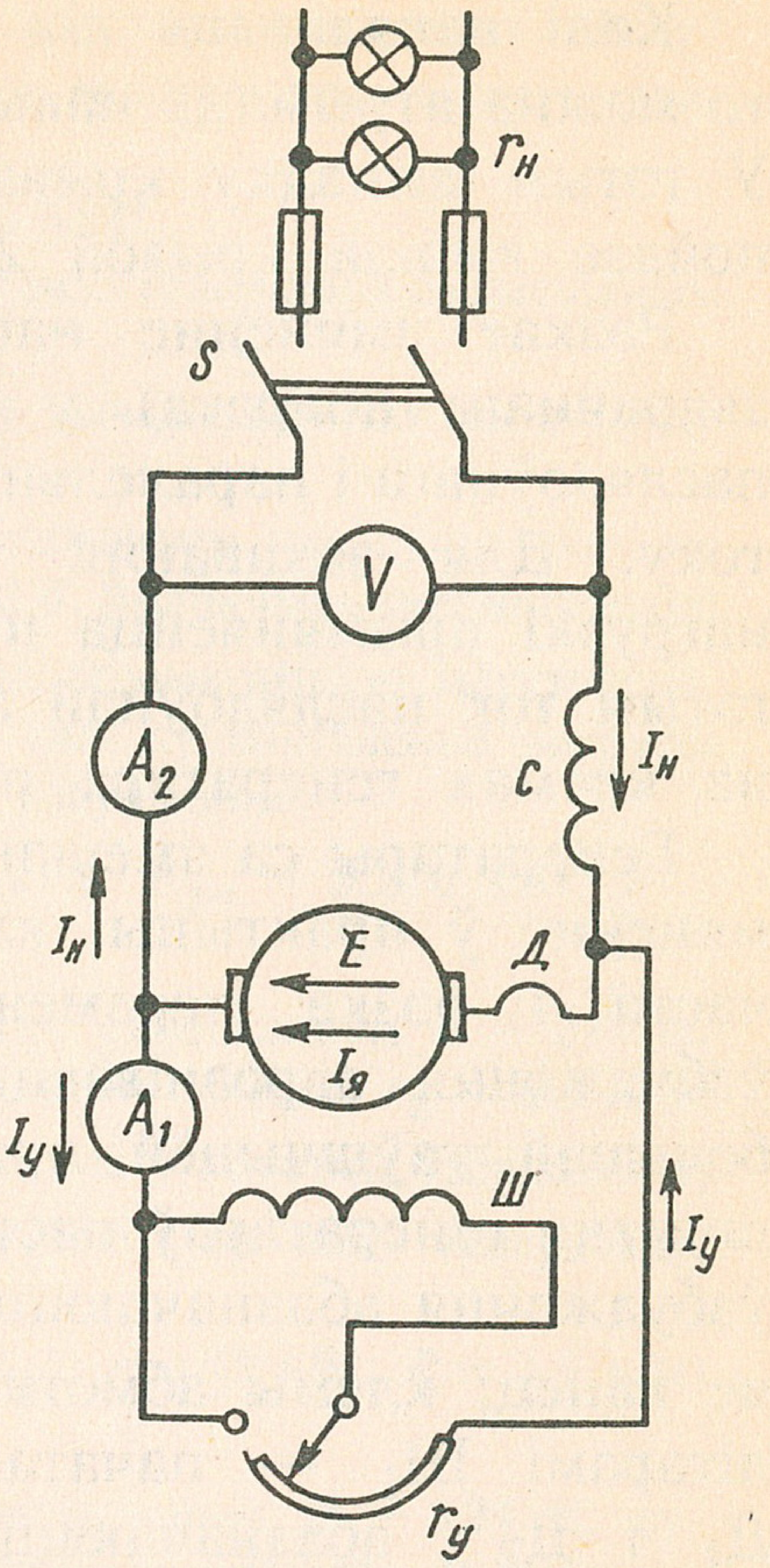
Знешняя характарыстыка генератара паказана на рыс. 7.11, *б*. Памяншэнне супраціўлення знешняга ланцуга генератара з паслядоўным узбуджэннем прыводзіць да павелічэння нагрузачнага току $I_н$. Павелічэнне току ў ланцугу прыводзіць да павелічэння магнітнага патоку машыны, што выклікае павелічэнне ЭРС генератара, і напружанне на яго клемах хутка расце. Гэта адпавядае ўчастку *ab* знешняй характарыстыкі. Пры магнітным насычэнні статара павелічэнне нагрузачнага току не дае прыкметнага павелічэння магнітнага патоку машыны, значыць, ЭРС і напружанне генератара павялічваюцца нязначна.

Пры кароткім замыканні ($r_н = 0$) падзенне напружання на знешнім участку ланцуга будзе роўнае нулю і ЭРС генератара будзе роўнае падзенню напружання на ўнутраным супраціўленні машыны, што стварае вялікі ток, небяспечны для абмоткі якара.

Знешняя характарыстыка генератара з паслядоўным узбуджэннем паказвае, што напружанне машыны залежыць ад яе нагрузкі. Гэта стварае ваганне напружання генератара ў залежнасці ад нагрузкі, што з'яўляецца яго недахопам. Генератары з паслядоўным узбуджэннем не знайшлі практычнага прымянення.

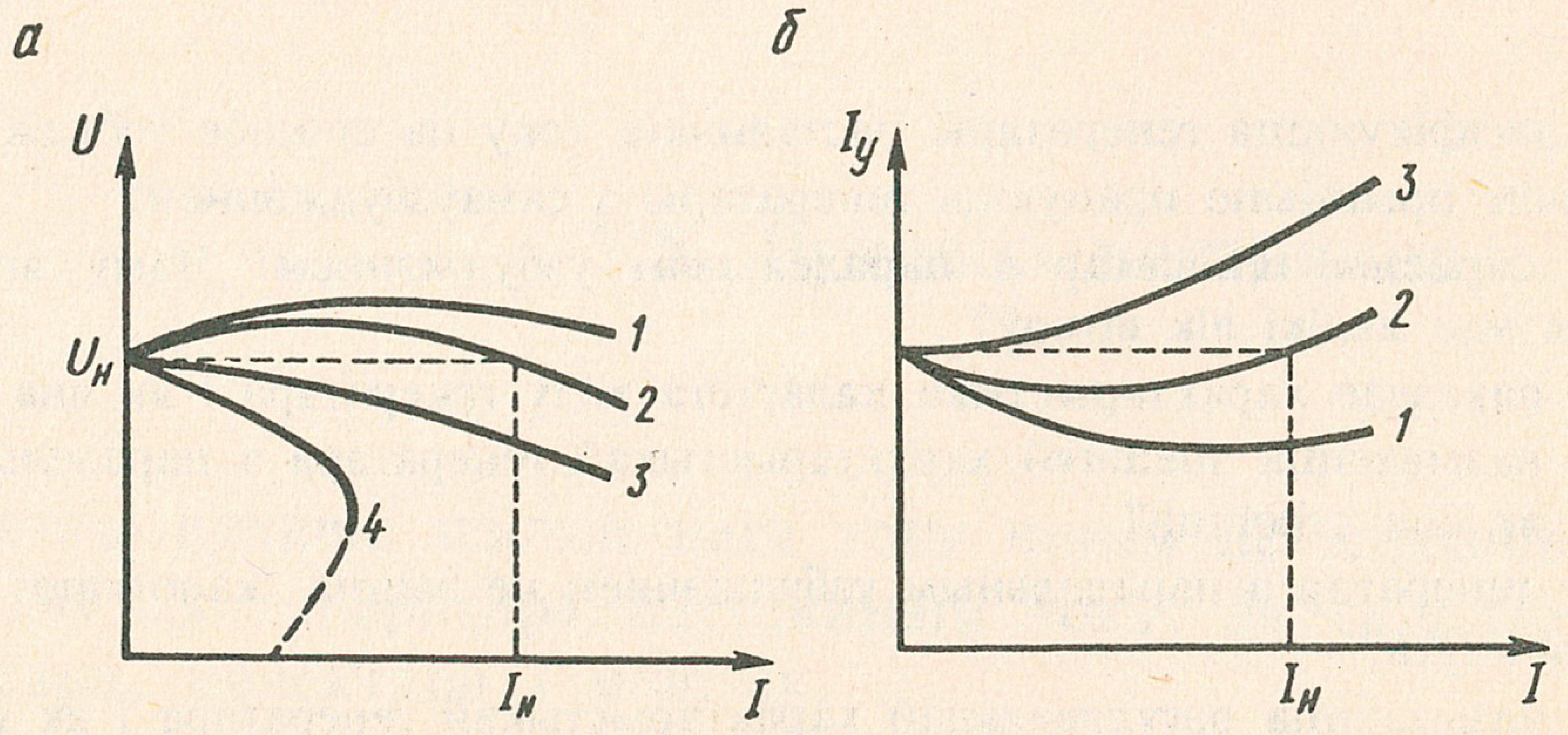
Генератары пастаяннага току са змешаным узбуджэннем (рыс. 7.12) маюць паралельную і паслядоўную абмоткі ўзбуджэння.

Характарыстыка халастога ходу генератара са змешаным убуджэннем такая, як і генератара з паралельным узбуджэннем, бо пры незамкнутым ланцугу абмотка паслядоўнага ўзбуджэння будзе таксама разамкнута.



Рыс. 7.12. Схема генератара пастаяннага току са змешаным узбуджэннем

Знешняя характарыстыка генератара са змешаным узбуджэннем паказана на рыс. 7.13, *а*. У генератарах з паралельным узбуджэннем павелічэнне нагрузкі вядзе да змяншэння напружання на клемах генератара (крывая *3*). У генератарах са змешаным узбуджэннем павелічэнне нагрузкі прыводзіць да павелічэння току ў абмотцы паслядоўнага ўзбуджэння, а гэта стварае павелічэнне магнітнага поля статара і ЭРС генератара. Павелічэнне ЭРС генератара кампенсуе падзенне напружання, і крывая *2* знешняй характарыстыкі размяшчаецца вышэй крывой *3*.



Рыс. 7.13. Характарыстыкі генератара са змешаным узбуджэннем:
а — знешнія; *б* — рэгулявальныя

Калі павялічыць лік віткоў паслядоўнай абмоткі ўзбуджэння, то можна атрымаць павышэнне напружання на клемах генератара. У гэтым выпадку крывая *1* знешняй характарыстыкі генератара пойдзе вышэй крывой *2*.

Рэзкае змяненне нагрузкі (уключэнне дугавога пражэктара, зварачнага апарата) у генератарах з адпавядаючымі абмоткамі паслядоўнага і паралельнага ўзбуджэння вядзе да вялікага змянення току. Для захавання току пастаянным пры рэзкім змяненні нагрузкі прымяняецца проціўключэнне паслядоўнай абмоткі. Пры гэтым ток паслядоўнай абмоткі размагнічвае статар і напружанне на клемах генератара рэзка падае (крывая *4*).

Генератары са змешаным узбуджэннем атрымалі шырокае прымяненне ў практыцы, калі патрэбна пастаяннае напружанне пры часта і рэзка пераменлівай нагрузцы. Абмотка паслядоўнага ўзбуджэння адрозніваецца ад абмоткі паралельнага ўзбуджэння большай таўшчынёй правадү і невялікай колькасцю віткоў. На шчытку генератараў пастаяннага току клемы абмоткі паслядоўнага ўзбуджэння абазначаюцца літарамі $С_1$ — пачатак абмоткі і $С_2$ — яе канец; клемы абмоткі паралельнага ўзбуджэння абазначаюцца літарамі $Ш_1$ — пачатак абмоткі і $Ш_2$ — яе канец; літарамі $Д_1$ і $Д_2$ абазначаюцца вывады абмоткі дадатковых полюсаў; літарамі $Я_1$ і $Я_2$ — вывады абмоткі якара. Стрэлкай паказаны кірунак вярчэння з боку калектара і даецца злучэнне вывадаў генератара пры гэтым вярчэнні.

Рэгулявальныя характарыстыкі генератара са змешаным узбуджэннем паказаны на рыс. 7.13, *б*. Крывая *1* адпавядае генератару з узмоцненай паслядоўнай абмоткай узбуджэння, крывая *2* — генератару з нармальнай паслядоўнай абмоткай і крывая *3* — генератару з паслабленай паслядоўнай абмоткай узбуджэння.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як класіфікуюцца генератары пастаяннага току па спосабе ўзбуджэння?
2. Па якім прынцыпе працуюць генератары з самаўзбуджэннем?
3. Як устроены генератар з паралельным узбуджэннем? Чаму яго абмотка ўзбуджэння мае вялікі лік віткоў?
4. Што паказвае характарыстыка халастога ходу генератара і як яна строіцца?
5. Што называецца знешняй характарыстыкай генератара з паралельным узбуджэннем і як яна строіцца?
6. Чаму генератар з паралельным узбуджэннем не баіцца кароткага замыкання знешняга ланцуга?
7. Што называецца рэгулявальнай характарыстыкай генератара і як яна вызначаецца для генератара з паралельным узбуджэннем?
8. Як вызначаецца знешняя характарыстыка генератара з паслядоўным узбуджэннем?

9. Ці баіцца генератар з паслядоўным узбуджэннем кароткага замыкання? Чаму?

10. Чаму генератары з паслядоўным узбуджэннем не знайшлі практычнага прымянення?

11. Як устроены генератары са змешаным узбуджэннем?

12. Як забяспечваецца пастаянства напружання на клемах генератара са змешаным узбуджэннем?

13. Як практычна вызначыць з дапамогай прыбораў вывады абмотак на шчытку генератара, калі яны не абазначаны?

14. Генератар пастаяннага току з паралельным узбуджэннем мае супраціўленне абмоткі якара $r_я = 0{,}1$ Ом, напружанне на клемах $U = 120$ В. Вызначыць супраціўленне абмоткі ўзбуджэння, ток у якары, ЭРС генератара, электрамагнітную магутнасць, карысную магутнасць, электрычны ККД генератара, калі супраціўленне нагрузкі $r_н = 3$ Ом, што складае 5 % супраціўлення абмоткі ўзбуджэння.

А д к а з: $r_ш = 60$ Ом; $I_я = 42$ А; $E = 124{,}2$ В; $P_{эм} = 5{,}216$ кВт; $P = 4{,}8$ кВт; $\eta = 0{,}92$.

15. ЭРС генератара пастаяннага току з паралельным узбуджэннем $E = 224$ В, напружанне на клемах $U = 220$ В, супраціўленне якарнай абмоткі $r_я = 0{,}2$ Ом, абмоткі ўзбуджэння $r_у = 100$ Ом. Вызначце ток у якары, ток у абмотцы ўзбуджэння, ток у нагрузцы, электрамагнітную магутнасць і магутнасць на валу генератара, электрычны ККД генератара.

А д к а з: $I_я = 20$ А; $I_у = 2{,}2$ А; $I_н = 17{,}8$ А; $P_{эм} = 4{,}48$ кВт; $P = 3{,}9$ кВт; $\eta = 0{,}87$.

16. Генератар з паслядоўным узбуджэннем мае напружанне $U = 124$ В, супраціўленне якарнай абмоткі $r_я = 0{,}3$ Ом, абмоткі ўзбуджэння $r_у = 0{,}2$ Ом. Вызначыць ЭРС і электрычны ККД генератара, калі намінальны ток пры рабоце $I = 12$ А.

А д к а з: $E = 130$ В; $\eta = 0{,}95$.

17. Генератар са змешаным узбуджэннем мае напружанне на клемах $U = 120$ В, супраціўленне якарнай абмоткі $r_я = 0{,}3$ Ом, шунтавой $r_ш = 200$ Ом, абмоткі паслядоўнага ўзбуджэння $r_с = 0{,}1$ Ом. Вызначыць ток у нагрузцы, ток у шунтавой абмотцы, ток у якары, ЭРС і электрамагнітную магутнасць генератара, супраціўленне нагрузкі, калі карысная магутнасць генератара $P = 2{,}4$ кВт.

А д к а з: $I_н = 20$ А; $I_ш = 0{,}6$ А; $I_я = 20{,}6$ А; $E = 128{,}2$ В; $P_{эм} = 2{,}64$ кВт; $r_н = 6$ Ом.

7.5. Рухавікі пастаяннага току

Электрычны рухавік пастаяннага току нічым не адрозніваецца па ўстройству ад генератара пастаяннага току: ён складаецца з якара, статара, калектара і шчотак.

Калі да электрычнай машыны падключыць пастаянны ток, то якар яе прыйдзе ў вярчэнне, машына стане рухавіком. Работа рухавіка заснавана на прынцыпе руху праваднiка з токам у

магнітным полі. Ток, які праходзіць па абмотках статара, стварае магнітнае поле, а ток у абмотцы якара прыводзіць яго ў рух, якар верціцца ў магнітным полі статара. Напрамак вярчэння якара вызначаецца правілам левай рукі. Для змянення напрамку вярчэння неабходна змяніць напрамак току ў якары або ў абмотцы статара. Такое змяненне напрамку вярчэння рухавіка называецца *рэверсаваннем.* Рэверсаванне ажыццяўляецца шляхам узаемнага пераключэння правадоў, падключаных да якара або статара. Адначасовае змяненне напрамку току ў статары і ў якары не прыводзіць да змянення напрамку вярчэння якара. Гэта значыць, што ўзаемнае пераключэнне правадоў, якія падведзены да рухавіка, не стварае рэверсавання. Змяняць напрамак току ў статары не рэкамендуецца, бо гэта прыводзіць да перамагнічвання стрыжня.

Рухавікі пастаяннага току, як і генератары пастаяннага току, па спосабе падключэння абмоткі ўзбуджэння падзяляюцца на рухавікі паралельнага, паслядоўнага і змешанага ўзбуджэння.

Вярчальны момант электрарухавіка пастаяннага току вызначаецца здабыткам электрычнай сілы і радыуса якара:

$$M_в = F \cdot D/2 . \qquad (7.4)$$

Электрычную сілу F, якая дзейнічае на ўсе праваднікі якара, можна вызначыць як здабытак сярэдняй сілы, якая дзейнічае на адзін праваднік, і колькасці праваднікоў N:

$$F = F_{ср} N.$$

Электрычная сіла, якая дзейнічае на праваднік з токам у магнітным полі,

$$F_1 = B\, l\, I \sin \alpha ,$$

дзе α — вугал паміж напрамкам магнітнага поля і вектарам хуткасці руху праваднікa.

Магнітная індукцыя B , даўжыня праваднікa l і ток I для ўсіх праваднікоў якара аднолькавыя, а $\sin \alpha$ змяняецца для двухполюснай машыны ў межах змянення α ад 0 да π у абедзвюх паралельных галінах. Сярэдняе значэнне $\sin \alpha$ у гэтых межах роўнае $2/\pi$.

Такім чынам, сярэдняе значэнне сілы, якая дзейнічае на адзін праваднік, выразіцца формулай

$$F_{ср} = \frac{1}{\pi} B\, l\, I_я ,$$

а сіла, якая дзейнічае на ўсе праваднікі якара,

$$F = \frac{1}{\pi} B\, l\, I_я N\,. \tag{7.5}$$

Падставім выраз (7.5) у формулу (7.4), атрымаем

$$M_в = \frac{1}{2\pi} B\, l\, D\, I_я N = \frac{1}{2\pi} \Phi\, I_я N\,, \tag{7.6}$$

дзе Φ — магнітны паток машыны, роўны магнітнай індукцыі B, памножанай на падоўжнае сячэнне якара (lD).

Такім чынам, вярчальны момант электрарухавіка прапарцыйны магнітнаму патоку машыны і току ў якары.

М а г у т н а с ц ь э л е к т р а р у х а в і к а вызначаецца здабыткам вярчальнага моманту M і вуглавой хуткасці вярчэння якара ω:

$$P = M\omega\,. \tag{7.7}$$

Падставім з формулы (7.6) значэнне M і $\omega = 2\pi n$ у формулу (7.7), атрымаем

$$P = \Phi I_я N n = k\Phi I_я\, n.$$

К К Д э л е к т р а р у х а в і к а (%) вызначаецца стасункам карыснай магутнасці P_2, якую здымаюць з вала, да падведзенай электрычнай магутнасці P_1:

$$\eta = P_2 / P_1 100 = P_2 / (UI_я)\, 100.$$

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

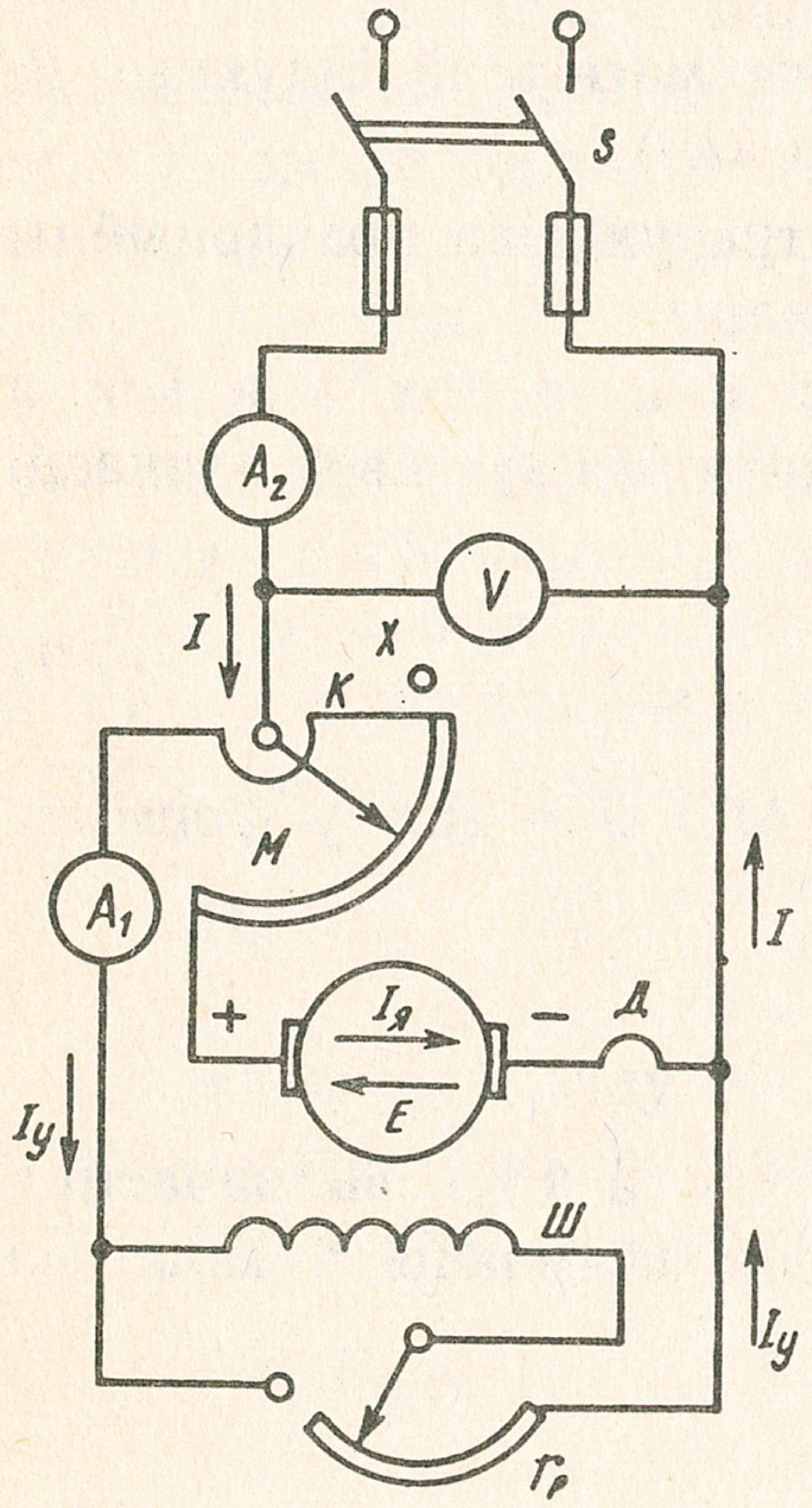
1. Па якім прынцыпе працуюць рухавікі пастаяннага току?
2. Як ажыццявіць рэверсаванне рухавіка пастаяннага току?
3. Ад чаго залежаць вярчальны момант і магутнасць рухавіка пастаяннага току?
4. Як вызначыць ККД рухавіка?
5. Якар рухавіка пастаяннага току, падключаны да напружання $U = 124$ В, верціцца з частатой $n = 24$ аб/с. Вызначыць ЭРС у якары, магутнасць і вярчальны момант рухавіка, калі супраціўленне якара $r_я = 0{,}2$ Ом, ток у якары $I_я = 20$ А.

А д к а з: $E = 120$ В; $P = 2{,}4$ кВт; $M = 15{,}91$ Н·м.

7.6. Рухавікі пастаяннага току з паралельным узбуджэннем

У рухавіках пастаяннага току з паралельным узбуджэннем абмотка ўзбуджэння мае вялікую колькасць віткоў тонкага праваду і падключаецца паралельна якару: $I = I_я + I_у$, дзе $I_я$ — ток у якары; $I_у$ — ток у абмотцы ўзбуджэння; I — ток у рухавіку.

Схема рухавіка з паралельным узбуджэннем паказана на рыс. 7.14. У рухавіках пастаяннага току з паралельным узбуджэннем супраціўленне абмоткі якара вельмі малое, таму пры непасрэдным уключэнні рухавіка ў сетку пастаяннага току праз якар пойдзе вялікі ток, які можа выклікаць расплаўленне кантактаў у калектары, перагрэў і нават згаранне абмоткі якара. Для памяншэння току ў момант пуску рухавіка паслядоўна з якарам уключаюць пускавы рэастат. Тады пускавы ток вызначыцца па формуле



Рыс. 7.14. Схема рухавіка з паралельным узбуджэннем

$$I_п = U/(r_я + r_п) \quad , \tag{7.8}$$

дзе U — напружанне сеткі; $r_я$ — супраціўленне абмоткі якара; $r_п$ — супраціўленне пускавога рэастата.

Супраціўленне пускавога рэастата падбіраецца так, каб пускавы ток не перавышаў намінальны ток рухавіка больш чым у 1,5 — 2 разы:

$$I_п = (1{,}5 — 2)I_н \ . \tag{7.9}$$

Значэнне намінальнага току ўказана на шчытку рухавіка. Такім чынам, з формул (7.8) і (7.9) атрымаем

$$r_п = \frac{U - (1{,}5 - 2)I_н r_я}{(1{,}5 - 2)I_н} \ .$$

Паколькі $I_н r_я$ — велічыня малая, то яе ў разлік можна не прымаць, значыць,

$$r_п = \frac{U}{(1,5-2)I_н}.$$

Як толькі якар рухавіка прыйдзе ў рух у магнітным полі статара, у яго абмотцы ўзбудзіцца ЭРС індукцыі, напрамак якой процілеглы падведзенаму напружанню. Па меры раскручвання якара процідзейная ЭРС павялічваецца, а ток у якары змяншаецца. Пускавы рэастат уключаецца ў час пуску рухавіка на 2—3 с. На працягу гэтага часу якар набывае намінальную хуткасць вярчэння, пры якой

$$I_я = \frac{U - E_{пр}}{r_я}. \tag{7.10}$$

Для вызначэння частаты вярчэння рухавіка падставім у формулу (7.10) значэнне ЭРС з формулы (7.2):

$$I_я = \frac{U - kn\Phi}{r_я}, \text{ адкуль } n = \frac{U - I_я r_я}{k\Phi}. \tag{7.11}$$

Пры пуску рухавіка рэгулявальны рэастат у ланцугу ўзбуджэння поўнасцю выводзіцца, што забяспечвае максімальны ток у ланцугу ўзбуджэння і максімальны магнітны паток статара. З формулы (7.11) бачна, што пры вялікім пускавым току ў якары памяншаецца лічнік, а пры вялікім току ў ланцугу ўзбуджэння павялічваецца назоўнік, што забяспечвае плаўны пуск рухавіка. Вярчальны момант якара пры пуску рухавіка, калі $I_я$ і Ф маюць максімальныя значэнні, становіцца дастатковым, каб пераадолець механічнае супраціўленне.

Рухавікі магутнасцю да 1 кВт пускаюцца ў ход без пускавога рэастата, паколькі абмотка якара ў іх мае дастатковае супраціўленне.

З формулы (7.11) бачна, што змяненне частаты вярчэння рухавіка можна ажыццявіць двума спосабамі: змяненнем напружання на клемах рухавіка і змяненнем магнітнага патоку статара. Змяненнем напружання на клемах нельга павялічыць частату вярчэння рухавіка, бо сетка мае пэўнае напружанне, якое можна толькі панізіць, акрамя гэтага, рухавік нельга падключаць пад напружанне, вышэйшае за намінальнае. Памяншэнне напружання на клемах забяспечваецца паслядоўным уключэннем рэастата, які забірае частку напружання на сябе.

Такі спосаб памяншэння частаты вярчэння рухавіка неэканамічны і ў практыцы сустракаецца рэдка, бо пры вялікім

супраціўленні рэастата на ім бескарысна траціцца вялікая колькасць энергіі.

Шырокае прымяненне ў практыцы атрымала змяненне частаты вярчэння рухавіка шляхам змянення магнітнага поля статара. Гэта змяненне ажыццяўляецца шляхам уключэння ў ланцуг абмоткі статара рэгулявальнага рэастата, змяненне супраціўлення якога прыводзіць да змянення току ўзбуджэння, а значыць, і магнітнага патоку статара. Гэты спосаб рэгулявання частаты вярчэння больш эканамічны, паколькі ў ланцуг статара адгаліноўваецца ток, які складае 3—5 % агульнага току, акрамя гэтага, ён дае магчымасць змяняць частату вярчэння рухавіка ў шырокіх межах.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як ажыццяўляецца пуск рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем?

2. Чаму пускавы рэастат уключаецца толькі ў час пуску рухавіка на 2—3 с?

3. Як рэгулюецца частата вярчэння рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем?

4. Вызначце вярчальны момант і магутнасць двухполюснага рухавіка з паралельным узбуджэннем, калі пры напружанні $U = 123$ В і току ў якары $I_я = 30$ А рухавік робіць 20 аб/с. Супраціўленне абмоткі якара $r_я = 0{,}1$ Ом.

Адказ: $M = 28{,}66$ Н · м; $P = 3{,}6$ кВт.

5. Рухавік пастаяннага току з паралельным узбуджэннем мае наступныя намінальныя даныя: магутнасць $P_{н2} = 5{,}6$ кВт; напружанне $U_н = 440$ В; ток $I_н = 16$ А; частату вярчэння $n_н = 15$ аб/с. Вызначце магутнасць P_1, якая падведзена да рухавіка, ККД і намінальны вярчальны момант рухавіка.

Адказ: $P_1 = 7{,}04$ кВт; $\eta = 79{,}54$ %; $M = 59{,}5$ Н · м.

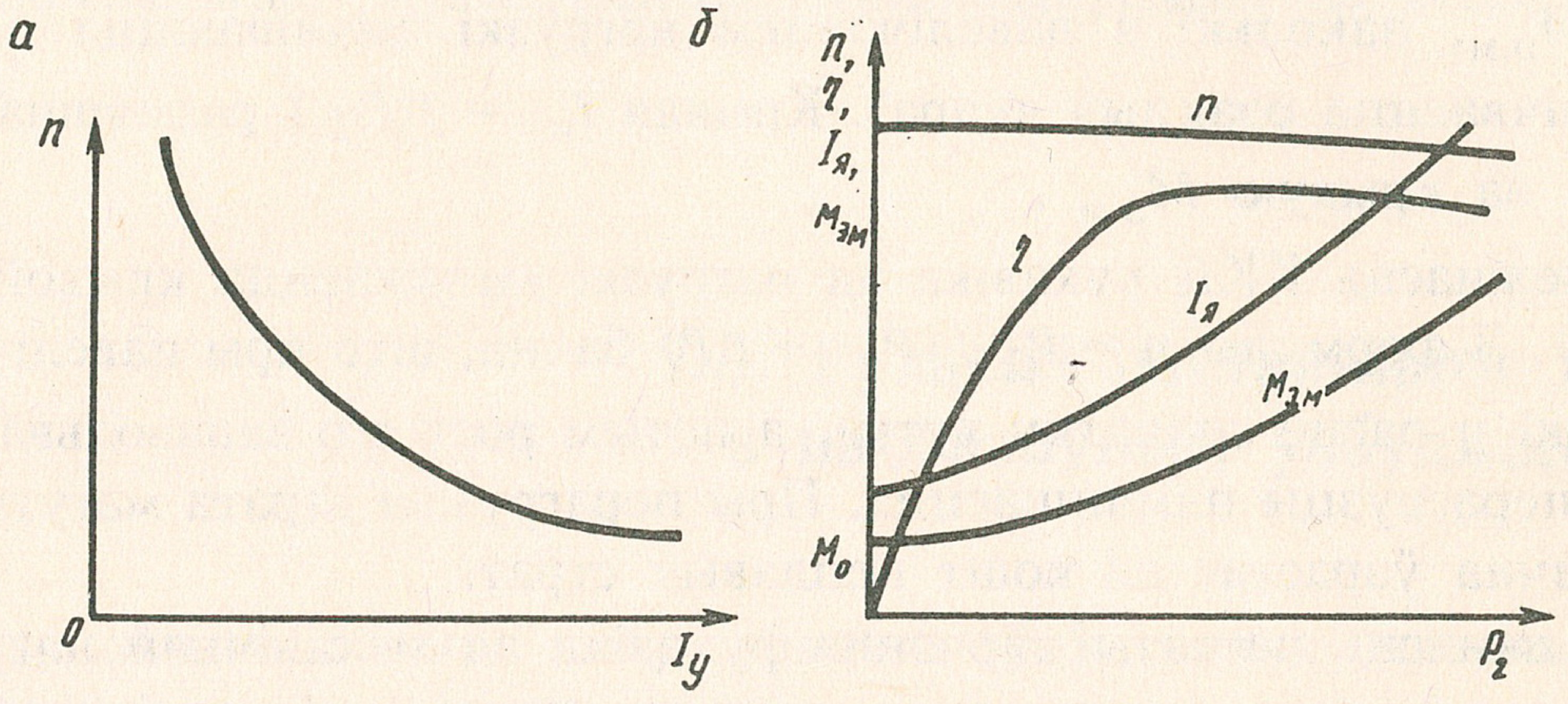
6. Вызначце супраціўленне пускавога рэастата для рухавіка паралельнага ўзбуджэння, калі пускавы ток у два разы большы за намінальны ток якара, $r_я = 1$ Ом. Рухавік разлічаны на напружанне $U = 180$ В і ток у якары $I_я = 15$ А.

Адказ: $r_п = 5$ Ом.

7.7. Характарыстыкі рухавіка з паралельным узбуджэннем

Характарыстыкай халастога ходу называецца залежнасць частаты вярчэння рухавіка ад току ўзбуджэння ($n = f(I_у)$) пры пастаянным напружанні сеткі ($U = \text{const}$). Характарыстыка ха-

ластога ходу паказана на рыс. 7.15, *а*. Пры памяншэнні току ўзбуджэння, а значыць і магнітнага поля статара, частата вярчэння якара будзе павялічвацца, і рухавік можа пайсці «ўразнос», перавысіць сваю граніцу трываласці. Выпадковы абрыў абмоткі ўзбуджэння пры малой нагрузцы рухавіка прыводзіць да перавышэння граніцы частаты вярчэння, а пры вялікай нагрузцы — да моцнага тармажэння і спынення, у выніку чаго па абмотцы якара пойдзе вялікі ток і яна можа згарэць. Усё гэта з'яўляецца недахопам рухавікоў з паралельным узбуджэннем.



Рыс. 7.15. Характарыстыкі рухавіка з паралельным узбуджэннем: *а* — халастога ходу; *б* — рабочыя

Рабочыя характарыстыкі рухавіка паказваюць залежнасць частаты вярчэння n, электрамагнітнага моманту $M_{э.м}$, току ў якары і ККД ад магутнасці на валу P_2 пры пастаянным напружанні і току ўзбуджэння (U = const; $I_у$ = const) (рыс. 7.15, *б*).

Змяненне нагрузкі прыводзіць да змянення частаты вярчэння рухавіка. Пры павелічэнні нагрузкі павялічваецца тармажэнне якара і частата вярчэння якара памяншаецца. Памяншэнне частаты вярчэння якара памяншае ў ім процідзейную ЭРС, а гэта, у адпаведнасці з формулай (7.10), вядзе да павелічэння току ў якары. Павелічэнне току ў якары павялічвае вярчальны момант да таго часу, пакуль не надыйдзе раўнавага момантаў ($M_в$ = $M_т$). Раўнавага момантаў надыходзіць пры некалькі паніжанай частаце вярчэння. Пры памяншэнні нагрузкі раўнавага момантаў надыходзіць пры павышэнні частаты вярчэння. Такім чынам, у рухавіках пастаяннага току з паралельным узбуджэннем частата вярчэння пры змяненні нагрузкі рэгулюецца процідзейнай ЭРС індукцыі якара.

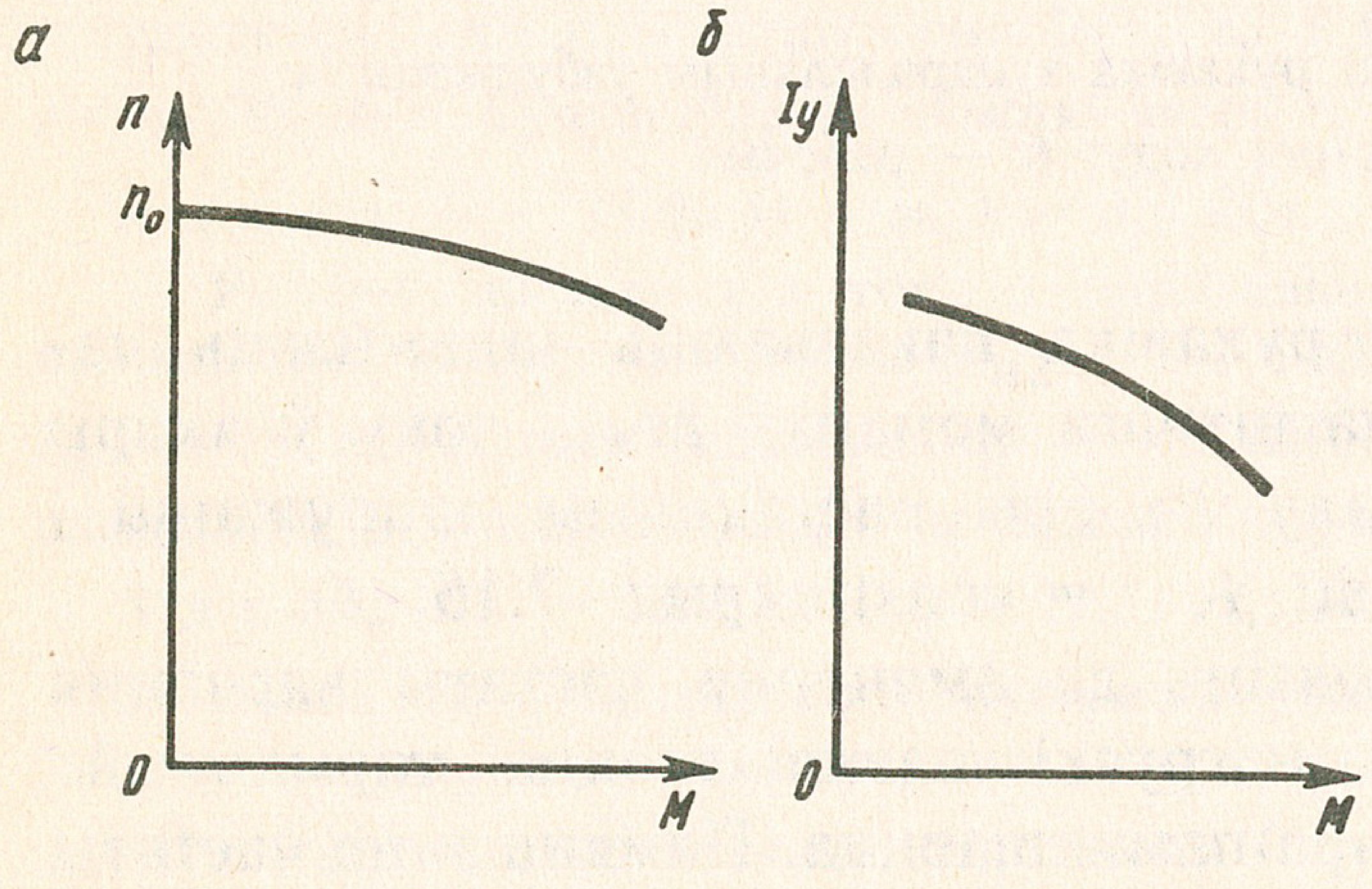
Механічны момант рухавіка

$$M_м = P_2 / \omega = P_2 / (2\pi n).$$

З павелічэннем P_2 частата вярчэння рухавіка n памяншаецца. Гэта значыць, што $M_м$ расце хутчэй за P_2 і характарыстыка $M_м = f(P_2)$ прадстаўляецца крывой, размешчанай над воссю P_2. Паколькі электрамагнітны момант роўны суме карыснага моманту на валу і момант страт халастога ходу ($M_{э.м} = M_м + M_0$), то крывая выходзіць не з пачатку каардынат, а з пункту M_0 на ардынаце. З формулы магутнасці $P_2 = \Phi N n I_я$, дзе $I_я = P_2 / (\Phi N n)$, бачна, што з павелічэннем магутнасці ток у якары расце хутчэй, чым $M_{э.м}$, паколькі з павелічэннем нагрузкі змяншаюцца n і Φ (павялічваецца рэакцыя якара). Крывая $I_я = f(P_2)$ размяшчаецца вышэй за крывую $M_{э.м}$.

Залежнасць ККД рухавіка ад нагрузкі выражаецца крывой $\eta = f(P_2)$. З формулы $\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P)$ бачна, што пры павелічэнні нагрузкі η расце спачатку хутка, а потым рост яго запавольваецца і пры перагрузцы памяншаецца. Пры перагрузцы страта магутнасці ΔP значна ўзрастае за кошт цеплавых страт.

Залежнасць частаты вярчэння рухавіка ад механічнай нагрузкі на валу ($n = f(M)$) пры пастаянных напружанні сеткі і току ў ланцугу ўзбуджэння (U = const, $I_у$ = const) называецца *механічнай характарыстыкай рухавіка* (рыс. 7.16, *а*). Пункт n_0 адпавядае частаце вярчэння якара пры халастым ходзе рухавіка. У рухавіках пастаяннага току з паралельным узбуджэннем пры пераходзе ад халастога ходу да намінальнай нагрузкі частата вярчэння змяняецца на 3—8 %. Устойлівасць частаты вярчэння рухавікоў гэтага тыпу дазваляе шырока выкарыстоўваць іх для прывадаў станкоў і машын.



Рыс. 7.16. Характарыстыкі рухавіка з паралельным узбуджэннем:
а — механічная; *б* — рэгулявальная

Для захоўвання частаты вярчэння рухавіка пры змяненні нагрузкі на валу рухавіка неабходна змяняць ток у ланцугу ўзбуджэння. Залежнасць току ўзбуджэння ад механічнай нагрузкі на валу ($I_у = f(M)$) пры пастаянных напружанні сеткі і частаце вярчэння (U = const, n = const) называецца *рэгулявальнай характарыстыкай рухавіка* (рыс. 7.16, *б*).

1. Што называецца характарыстыкай халастога ходу рухавіка і як яе начарціць?

2. Якія характарыстыкі рухавіка называюцца рабочымі?

3. Чым тлумачыцца жорсткасць хуткаснай характарыстыкі рухавіка з паралельным узбуджэннем?

4. Чаму з павелічэннем магутнасці нагрузкі на валу рухавіка павялічваецца ток у якары?

5. Як залежыць ККД рухавіка ад магутнасці нагрузкі на валу рухавіка?

6. Што называецца механічнай характарыстыкай рухавіка і як яе начарціць?

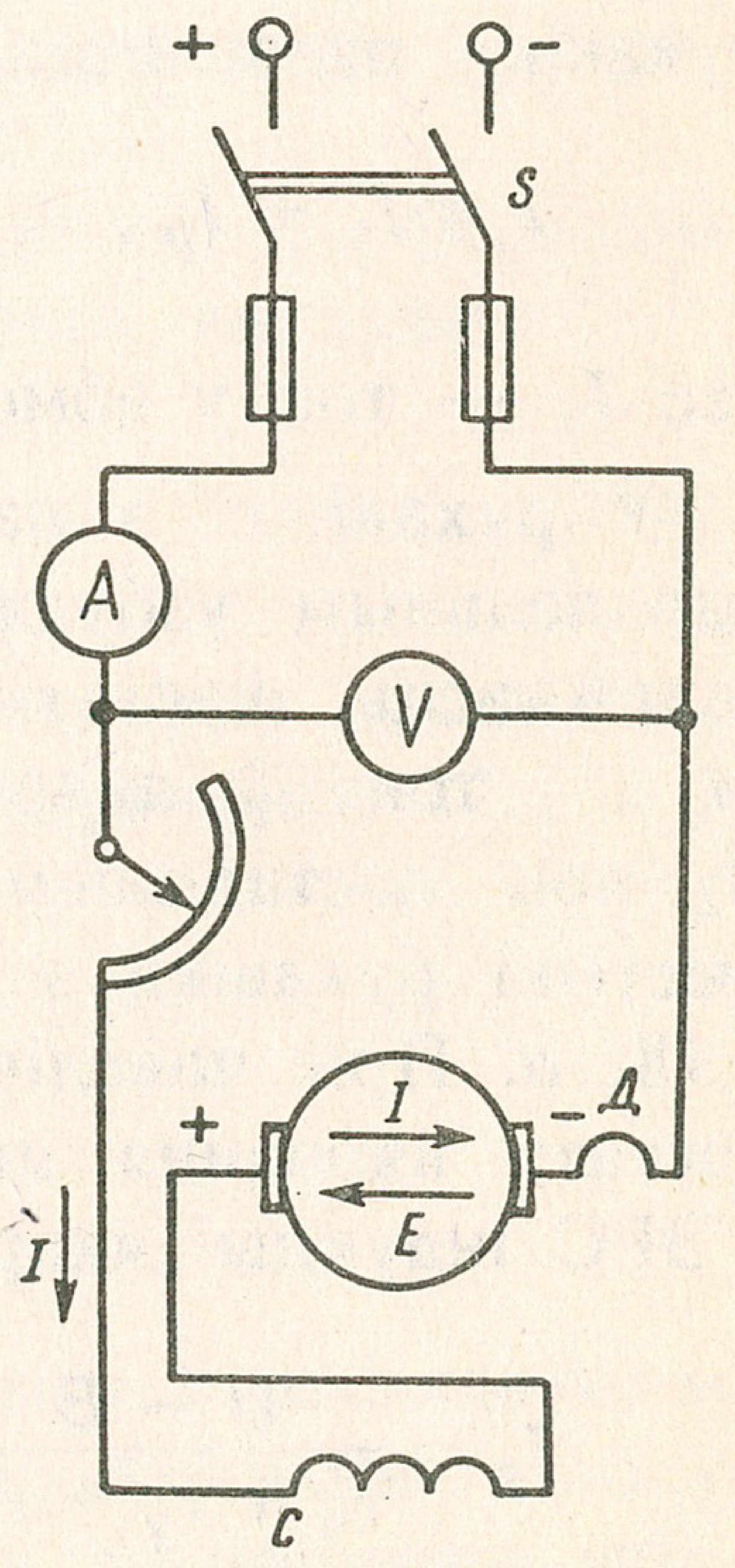
7. Што называецца рэгулявальнай характарыстыкай рухавіка і як яе начарціць?

7.8. Рухавікі пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем

У рухавіках гэтага тыпу абмотка ўзбуджэння мае малую колькасць віткоў тоўстага праваду і ўключаецца паслядоўна з якарам. Ток, які ідзе ў рухавік з сеткі, паслядоўна праходзіць праз абмотку якара і абмотку ўзбуджэння: $I = I_я = I_у$. Схема рухавіка з паслядоўным узбуджэннем паказана на рыс. 7.17.

В я р ч а л ь н ы м о м а н т рухавіка з паслядоўным узбуджэннем прапарцыйны току ў якары і магнітнаму патоку статара. Паколькі магнітны паток статара прапарцыйны току, то вярчальны момант рухавіка прапарцыйны квадрату току. Такая залежнасць будзе мець месца да таго часу, пакуль стрыжань статара не дасягне магнітнага насычэння. Пры ўмовах магнітнага насычэння статара вярчальны момант рухавіка будзе прапарцыйны першай ступені значэння току ў якары, як і ў рухавіку з паралельным узбуджэннем. Пры пуску рухавіка ток у якары вызначаецца па формуле

$$I_я = U/(r_я + r_у + r_д + r_п) ,$$



Рыс. 7.17. Схема рухавіка з паслядоўным узбуджэннем

дзе $r_я$ — супраціўленне якара; $r_у$ — супраціўленне абмоткі ўзбуджэння; $r_д$ — супраціўленне абмоткі дадатковых полюсаў; $r_п$ —

супраціўленне пускавога рэастата, які поўнасцю ўводзіцца ў момант пуску рухавіка.

Пускавы ток значна большы за намінальны, значыць, і пускавы вярчальны момант рухавіка даволі вялікі. Пры невялікай нагрузцы якар рухавіка можа набыць вельмі вялікую частату вярчэння, небяспечную для яго механічнай трываласці. Таму рухавік з паслядоўным узбуджэннем нельга пускаць у ход без нагрузкі. Нагрузка павінна складаць не менш як 20—25 % намінальнай магутнасці рухавіка.

У рабочым рэжыме частата вярчэння рухавіка вызначаецца па формуле

$$n = \frac{U - (r_я + r_у + r_д)I_я}{k\Phi}. \tag{7.12}$$

Змяненне частаты вярчэння рухавіка, як бачна з формулы (7.12), можна ажыццявіць як змяненнем напружання, так і змяненнем магнітнага патоку статара. Рэгуляванне частаты вярчэння з дапамогай змянення напружання ажыццяўляецца паслядоўным уключэннем рэастата, які забірае частку напружання на сябе. Больш эканомным з'яўляецца спосаб рэгулявання частаты вярчэння рухавіка з дапамогай змянення магнітнага патоку, што ажыццяўляецца падключэннем паралельна абмотцы ўзбуджэння рэгулявальнага рэастата. У гэтым выпадку агульны ток узбуджэння рухавіка падзеліцца на дзве паралельныя галіны:

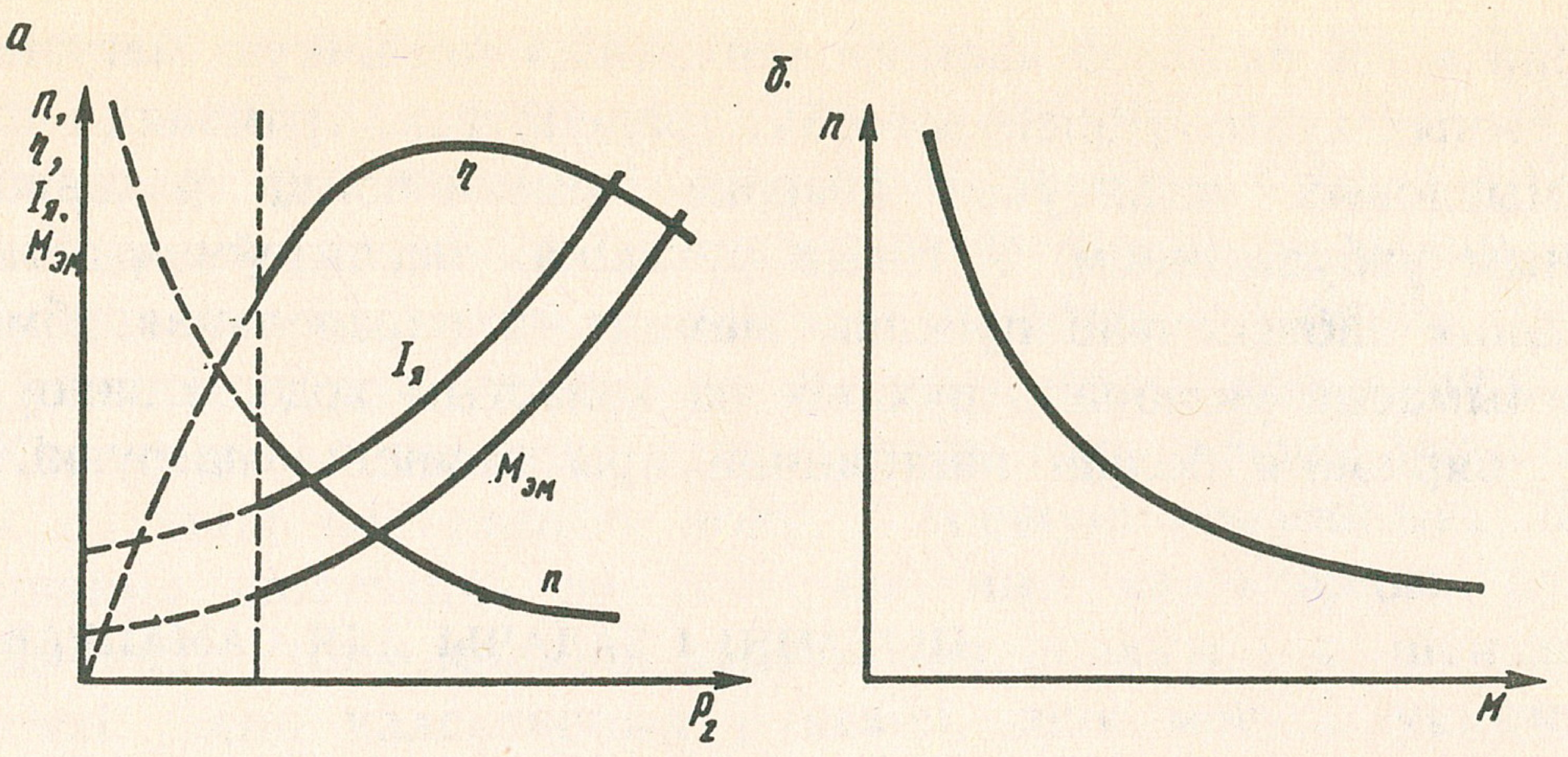
$$I = I_у + I_р ,$$

дзе $I_у$ — ток у абмотцы ўзбуджэння; $I_р$ — ток у рэастаце.

У рухавіках з паслядоўным узбуджэннем, як і ў рухавіках з паралельным узбуджэннем, рабочыя характарыстыкі паказваюць залежнасць частаты вярчэння n, электрамагнітнага моманту $M_{э.м}$, току ў якары $I_я$ і ККД ад магутнасці на валу рухавіка P_2 пры пастаянным напружанні (U = const). Рабочыя характарыстыкі рухавіка з паслядоўным узбуджэннем паказаны на рыс. 7.18, *а*. Пры павелічэнні нагрузкі рухавіка (тармазнога моманту) частата вярчэння якара памяншаецца, а значыць, паменшыцца і ЭРС індукцыі якара, што прыводзіць да павелічэння ў ім току:

$$I_я = \frac{U - E}{r_я + r_у + r_д}.$$

Павелічэнне току ў якары памяншае лічнік і павялічвае назоўнік у формуле (7.12), што прыводзіць да рэзкага падзення частаты



Рыс. 7.18. Характарыстыкі рухавіка з паслядоўным узбуджэннем:

а — рабочыя; *б* — механічная

рухавіка з павелічэннем нагрузкі. У той жа час павелічэнне нагрузкі прыводзіць да рэзкага павелічэння вярчальнага моманту рухавіка, паколькі вярчальны момант прапарцыйны квадрату току. Такім чынам, рухавік пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем не баіцца перагрузкі. Павелічэнне нагрузкі прыводзіць да павелічэння вярчальнага моманту рухавіка і зніжэння частаты яго вярчэння. Памяншэнне нагрузкі прыводзіць да павелічэння частаты вярчэння якара, і пры малой нагрузцы рухавік можа пайсці «ўразнос». ДАСТ дапускае павышэнне частаты вярчэння на 50 % звыш намінальнай.

Крывая залежнасці ККД ад магутнасці на валу рухавіка з паслядоўным узбуджэннем аналагічная крывой рухавіка з паралельным узбуджэннем.

Для рухавікоў з паслядоўным узбуджэннем на аснове формулы (7.6) электрамагнітны момант запішацца ў такім выглядзе:

$$M_{э.м} = k_1 \Phi I_я = k'_1 \Phi^2 , \qquad (7.13)$$

бо абмотка ўзбуджэння злучана паслядоўна з якарам і магнітны паток статара прапарцыйны току. Падставім выражэнне (7.13) у формулу (7.11) і атрымаем

$$n = \frac{U - r_я I_я}{k\,\Phi} = \frac{U - r_я I_я}{k' \sqrt{M_м + M_0}} .$$

Механічная характарыстыка $n = f(M)$ рухавіка з паслядоўным узбуджэннем паказана на рыс. 7.18, *б.* Рухавікі пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем знайшлі шырокае прымяненне там, дзе пры вялікай нагрузцы патрэбна вялікая магутнасць, але невялікая частата вярчэння, і, наадварот, дзе пры малых нагрузках

пажадана мець вялікую частату вярчэння і невялікую магутнасць (у пад'ёмных кранах, электравозах, тралейбусах, трамваях і г. д.). У прамысловых устаноўках шырока прымяняюцца рухавікі са змешаным узбуджэннем. У гэтых рухавіках паслядоўная абмотка ўзбуджэння забяспечвае пускавы момант, а паралельная абмотка дае магчымасць уключаць рухавік на халастым ходзе і захоўваць частату вярчэння больш пастаяннай пры змяненні нагрузкі.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як залежыць вярчальны момант рухавіка з паслядоўным узбуджэннем ад току ў якары?
2. Як ажыццяўляецца пуск рухавіка з паслядоўным узбуджэннем?
3. Чаму нельга пускаць у ход рухавік з паслядоўным узбуджэннем без нагрузкі?
4. Як ажыццяўляецца рэгуляванне частаты вярчэння рухавіка з паслядоўным узбуджэннем?
5. Як чэрцяцца рабочыя характарыстыкі рухавіка з паслядоўным узбуджэннем?
6. Дзе прымяняюцца рухавікі з паслядоўным узбуджэннем?
7. Якія асаблівасці мае рухавік са змешаным узбуджэннем?
8. Рухавік пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем мае наступныя намінальныя даныя: магутнасць $P_{н2}$ = 10,5 кВт; напружанне $U_н$ = 440 В; ток $I_н$ = 28 А; частата вярчэння $n_н$ = 20 аб/с. Вызначце магутнасць, якая падведзена да рухавіка, ККД рухавіка, узбуджаную ў якары ЭРС, вярчальны момант рухавіка і падзенне напружання на якары, калі якар рухавіка мае N = 856 актыўных праваднікоў, адну пару галін a = 1, дзве пары полюсаў p = 2 і магнітны паток полюса $\Phi = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Вб.

А д к а з: P_1 = 12,32 кВт; η = 85,23 %; E = 410,88 В; M = 83,56 Н · м; $U_я$ = 29,12 В.

7.9. Калектарны рухавік пераменнага току

У калектарных рухавіках абмотка ўзбуджэння злучаецца з якарам паслядоўна або паралельна. Таму пры ўключэнні калектарнага рухавіка ў сетку пераменнага току напрамак току ў якары і абмотках будзе змяняцца адначасова. Адначасовае змяненне напрамку магнітнага поля і току ў якары не змяняе напрамку вярчэння якара. Таму якар калектарнай машыны, якая ўключана ў сетку пераменнага току, будзе вярцецца.

Калектарныя рухавікі з паралельным узбуджэннем, уключаныя ў сетку пераменнага току, маюць невялікі вярчальны момант, бо

статар мае вялікае індуктыўнае супраціўленне, і зрух фаз паміж токам у якары і магнітным патокам статара блізкі да 90°. Пры такім зруху фаз вярчальны момант якара малы ($M_в = kI\Phi\cos\varphi$). Калектарныя рухавікі з паслядоўным узбуджэннем маюць невялікі зрух фаз паміж токам у якары і магнітным патокам статара і прымяняюцца для ўключэння ў сетку пераменнага току.

Калектарныя рухавікі пераменнага току маюць меншы ККД, чым рухавікі пастаяннага току, і горшую камутацыю. Для памяншэння камутацыі ва ўсіх магутных калектарных рухавіках пераменнага току маюцца дадатковыя полюсы і кампенсацыйныя абмоткі. Ёсць калектарныя рухавікі, якія могуць уключацца ў сетку пастаяннага і пераменнага току. Такія рухавікі называюцца *універсальнымі.*

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Па якім прынцыпе працуюць калектарныя рухавікі пераменнага току?
2. Чаму калектарныя рухавікі з паралельным узбуджэннем маюць меншы вярчальны момант, чым рухавікі з паслядоўным узбуджэннем?
3. Дзе прымяняюцца калектарныя рухавікі пераменнага току?
4. Якія калектарныя рухавікі называюцца універсальнымі?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 14

Даследаванне генератара пастаяннага току

М э т а р а б о т ы: навучыцца здымаць характарыстыкі генератара пастаяннага току з паралельным, паслядоўным і змешаным узбуджэннем. Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен навучыцца здымаць характарыстыку халастога ходу, знешнюю і рэгулявальную характарыстыкі генератара, чарціць графікі гэтых характарыстык, навучыцца збіраць электрычныя ланцугі і вымяраць электрычныя велічыні.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 7.4. падручніка. Крыніцай механічнай энергіі для генератара ў гэтай рабоце з'яўляецца трохфазны асінхронны

рухавік з кароткаЗамкнутым ротарам, пры гэтым частата вярчэння асінхроннага рухавіка павінна адпавядаць намінальнай частаце вярчэння якара генератара, а магутнасць у 1,5—2 разы перавышаць намінальную магутнасць генератара. Асінхронны рухавік і генератар пастаяннага току ўстанаўліваюцца на адным фундаменце, восі іх цэнтруюцца і жорстка змацоўваюцца муфтай. Нагрузкай генератара з'яўляецца нагрузачны рэастат. Для змянення току ў абмотцы ўзбуджэння прымяняецца высокаомны паўзунковы рэастат (рэгулявальны рэастат).

Выкананне работы

I. Вывучыце генератар пастаяннага току з паралельным узбуджэннем.

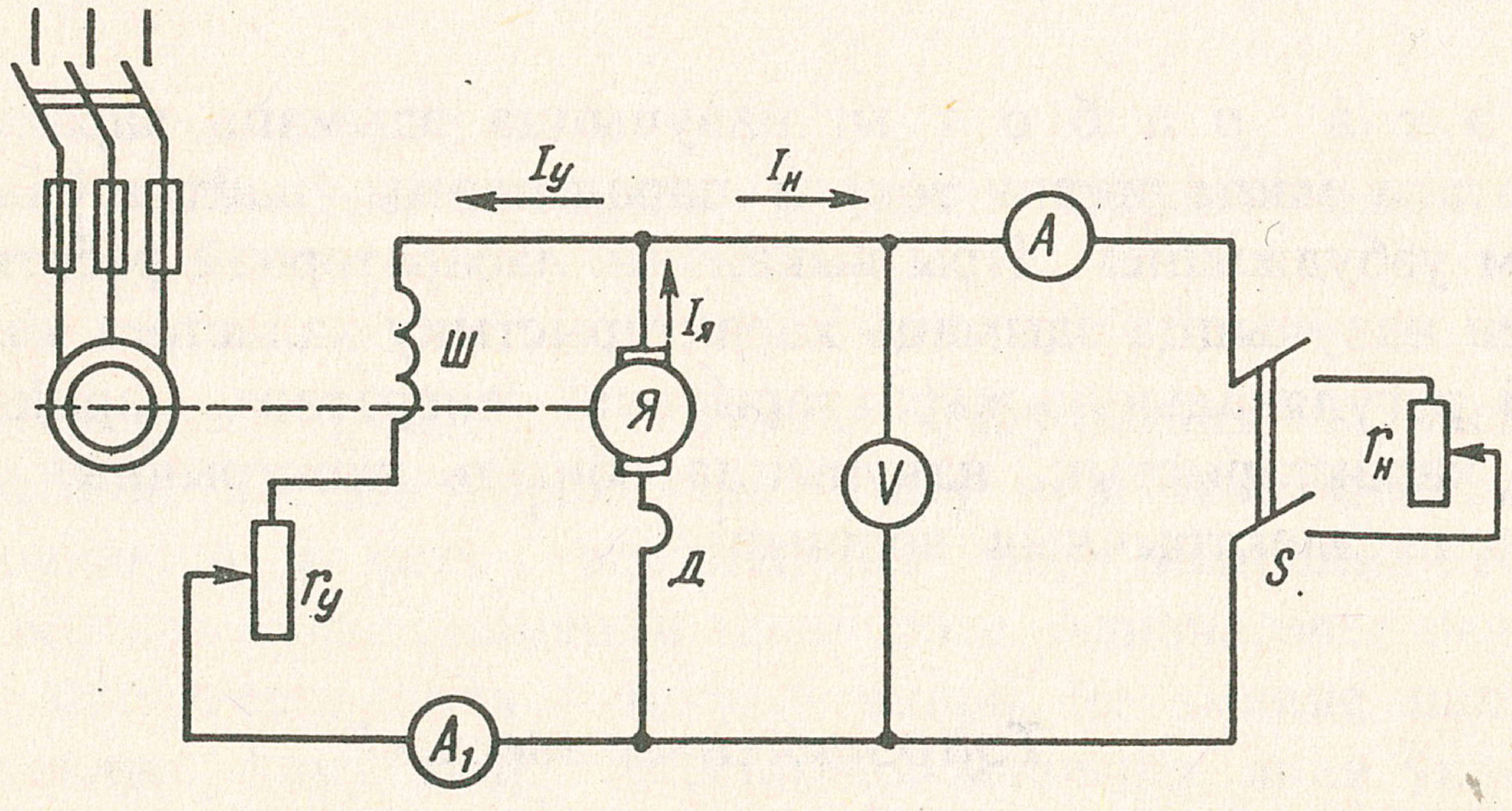
1. Запішыце пашпартныя даныя асінхроннага рухавіка і генератара пастаяннага току.

2. Збярыце электрычны ланцуг па схеме на рыс. 7.19.

3. Здыміце характарыстыку халастога ходу генератара з паралельным узбуджэннем:

а) вымерайце ЭРС астаткавага магнетызму E_0 пры незамкнутым ланцугу абмоткі ўзбуджэння;

б) замкніце ланцуг абмоткі ўзбуджэння і паступова памяншайце супраціўленне рэгулявальнага рэастата. Паказанні амперметра A1 і вальтметра V запішыце ў табл. 1. Павялічвайце ЭРС генератара да намінальнага значэння.



Рыс. 7.19. Схема ланцуга для зняцця характарыстык генератара з паралельным узбуджэннем

Табліца 1

Нумар вымярэння	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_у$, мА												
E, В												

4. Начарціце прамую і адваротную галіны характарыстыкі халастога ходу генератара $E = f(I_у)$ і растлумачце атрыманне дзвюх галін характарыстыкі.

5. Здыміце знешнюю характарыстыку генератара з паралельным узбуджэннем:

а) узбудзіце генератар на халастым ходзе да намінальнай ЭРС;

б) падключыце спачатку мінімальную нагрузку (поўнае супраціўленне нагрузачнага рэастата), потым паступова павялічвайце нагрузку да кароткага замыкання. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2.

Табліца 2

Нумар вымярэння	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_н$, А										
U, В										

6. Спыніце генератар. Спачатку выключыце нагрузку (паступова павялічвайце супраціўленне нагрузачнага рэастата), потым павялічвайце супраціўленне рэгулявальнага рэастата, давядзіце ЭРС да мінімальнага значэння. Разамкніце ланцуг абмоткі ўзбуджэння і выключыце асінхронны рухавік з сеткі.

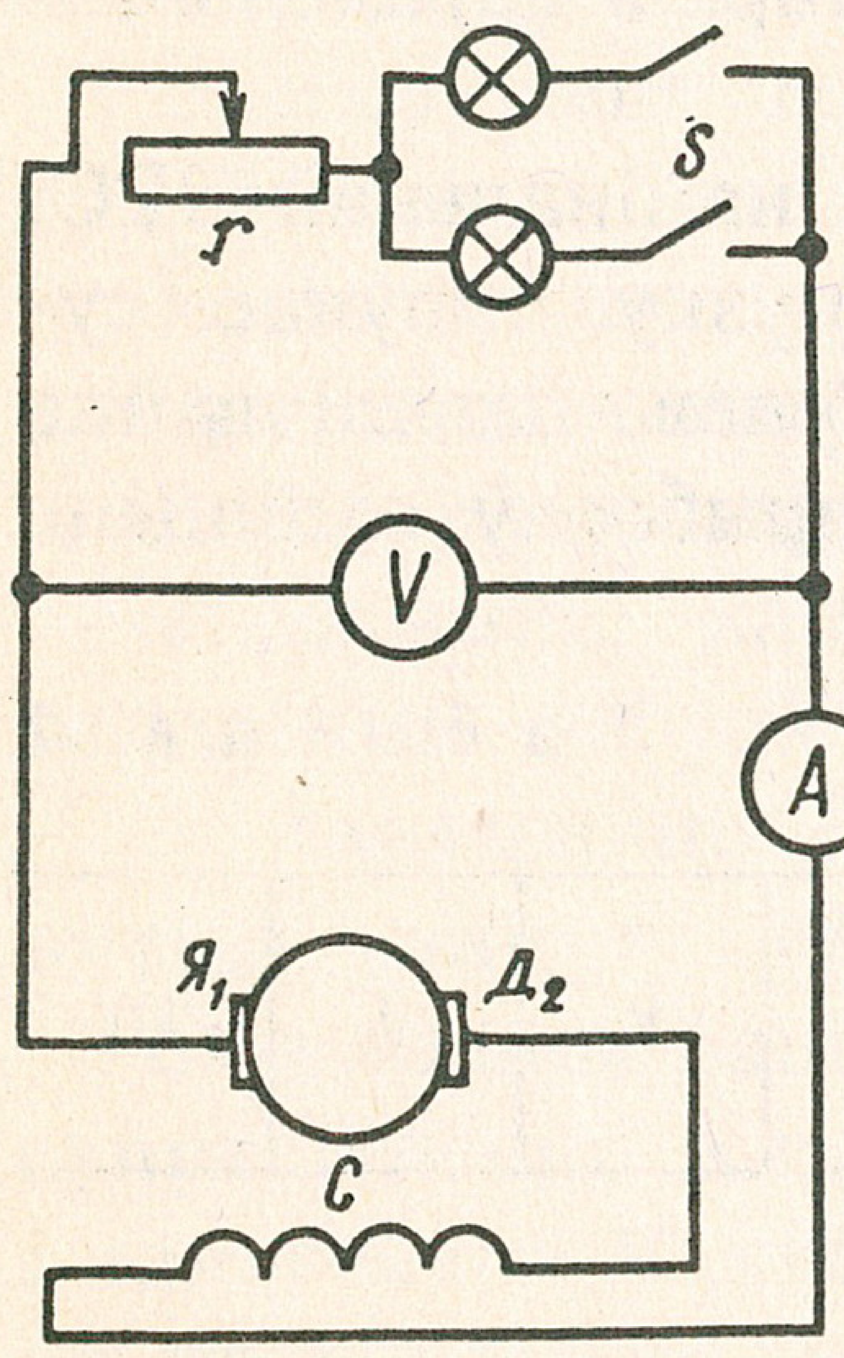
7. Начарціце графік знешняй характарыстыкі генератара з паралельным узбуджэннем $U = f(I_н)$ і растлумачце яго.

8. Здыміце рэгулявальную характарыстыку. Узбудзіце генератар да намінальнай ЭРС і ўключыце нагрузку. Пры павелічэнні нагрузкі напружанне генератара памяншаецца. Каб захаваць напружанне на клемах генератара пастаянным, трэба павялічваць ток у абмотцы ўзбуджэння, гэта значыць павялічваць ЭРС ге-

нератара. Павялічвайце паступова нагрузку генератара да намінальнага значэння. Для захавання напружання на клемах генератара пастаянным (U = const) павялічвайце ток у абмотцы ўзбуджэння $I_у$. Паказанні амперметраў $A_н$ і $A_у$ запішыце ў табл. 3.

Т а б л і ц а 3

Нумар вымярэння	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_н$, А										
$I_у$, мА										



Рыс. 7.20. Схема ланцуга для зняцця знешняй характарыстыкі генератара з паслядоўным узбуджэннем

9. Начарціце графік рэгулявальнай характарыстыкі.

II. Вывучыце генератар пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем.

1. Запішыце пашпартныя даныя асінхроннага рухавіка і генератара пастаяннага току.

2. Збярыце электрычны ланцуг па схеме на рыс. 7.20. Нагрузкай генератара можа служыць драцяны або лямпавы рэастат.

3. Характарыстыкі халастога ходу для генератара з паслядоўным узбуджэннем не існуе. Здымíце знешнюю характарыстыку генератара з паслядоўным узбуджэннем. Уключыце рухавік у сетку і павялічвайце нагрузку генератара. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 4.

Т а б л і ц а 4

Нумар вымярэння	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_н$, А										
U, В										

4. Начарціце графік знешняй характарыстыкі і растлумачце яго.

III. Вывучыце генератар са змешаным узбуджэннем.

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме на рыс. 7.12. Нагрузкай генератара можа служыць лямпавы або драцяны рэастат.

2. Здыміце знешнюю характарыстыку генератара:

а) узбудзіце генератар на халастым ходзе да намінальнага значэння ЭРС;

б) падключыце спачатку мінімальную нагрузку, потым павялічвайце нагрузку да намінальнага нагрузачнага току. Здыміце 5—6 паказанняў прыбораў і запішыце ў табл. 4.

3. Спыніце генератар. Спачатку пастулова выключайце нагрузку (павялічвайце супраціўленне нагрузкі), потым памяншайце ток у абмотцы ўзбуджэння і выключыце з сеткі асінхронны рухавік.

4. Начарціце графік знешняй характарыстыкі генератара і растлумачце яго.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Чым абумоўлена нелінейная залежнасць ЭРС генератара ад току ўзбуджэння?

2. Чаму генератар пастаяннага току з паралельным узбуджэннем не баіцца кароткага замыкання?

3. Ці можна ўзбудзіць генератар з паралельным узбуджэннем пры кароткім замыканні нагрузкі?

4. Чаму генератар пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем баіцца кароткага замыкання?

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 15

Даследаванне рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем

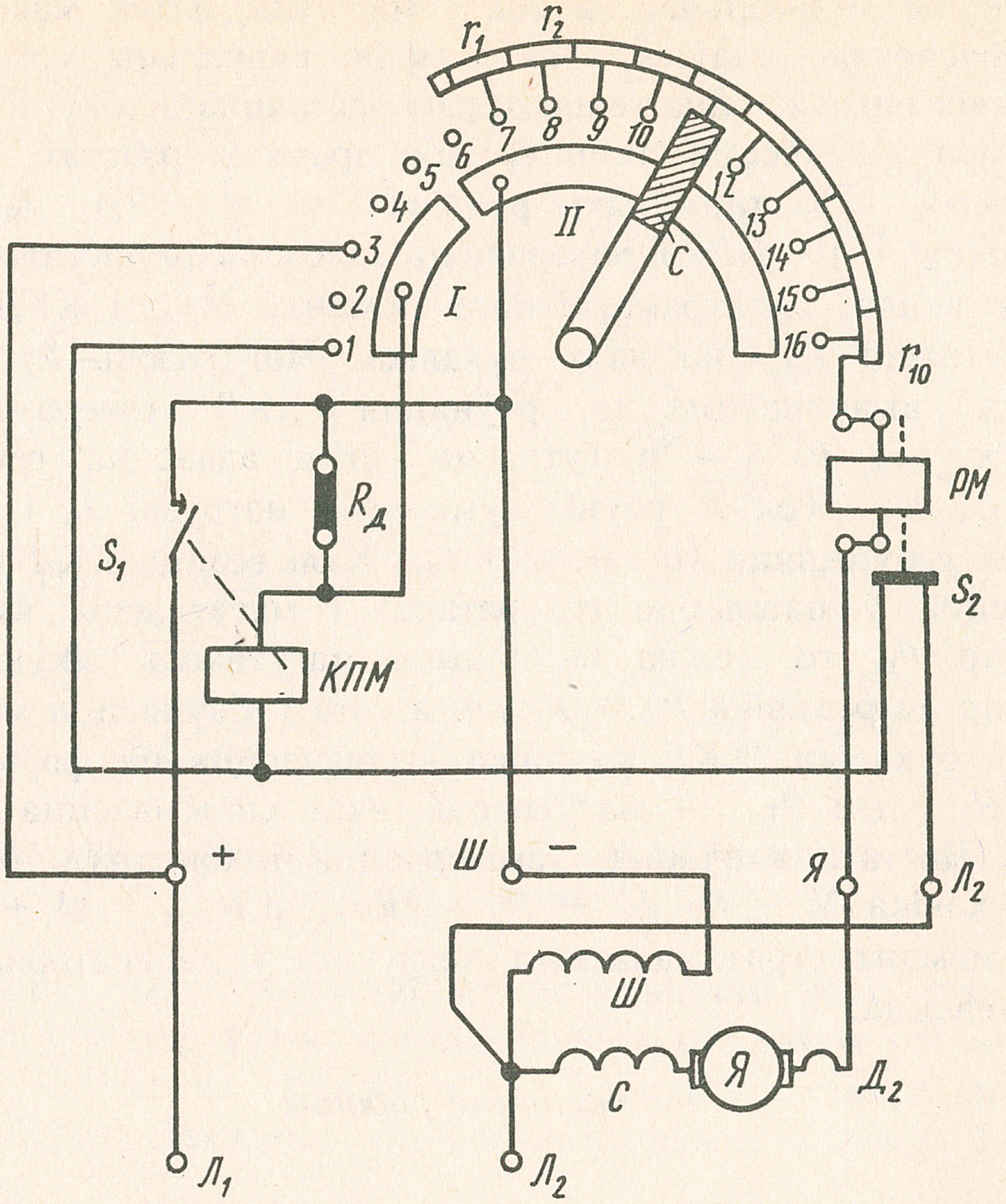
М э т а р а б о т ы: вывучыць устройства, пуск і работу рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем. Навучыцца здымаць рабочыя характарыстыкі рухавіка.

Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен навучыцца вызначаць вывады якарнай абмоткі ($Я_1 Я_2$), абмоткі паралельнага ($Ш_1 Ш_2$) і паслядоўнага ($C_1 C_2$) узбуджэння рухавіка, ажыццяўляць пуск рухавіка з дапамогай пускавога рэастата, рэгуляваць хуткасць рухавіка, здымаць характарыстыкі і чарціць графікі характарыстык рухавіка.

Вывучыце § 7.6 і 7.7 падручніка. У абмотку паралельнага ўзбуджэння адгаліноўваецца 3—5 % падведзенага току, а праз абмотку паслядоўнага ўзбуджэння праходзіць увесь ток, таму абмотка паралельнага ўзбуджэння мае вялікі лік віткоў тонкага проваду, а абмотка паслядоўнага ўзбуджэння — малы лік віткоў тоўстага проваду. Вывады абмотак узбуджэння на шчытку рухавіка можна вызначыць з дапамогай омметра або лямпачкі напальвання, якая падключаецца ў ланцуг пераменнага току паслядоўна з абмоткай узбуджння. Якарная абмотка і абмотка паслядоўнага ўзбуджэння маюць прыблізна аднолькавае супраціўленне. Вызначыць вывады гэтых абмотак можна наступным чынам. Пры вярчэнні якара ў якарнай абмотцы ўзбудзіцца ЭРС індукцыі і амперметр, падлючаны да вывадаў якарнай абмоткі, пакажа ток. У абмотцы ўзбуджэння пры вярчэнні якара не будзе ўзбуджацца ЭРС індукцыі, і стрэлка амперметра не адхіліцца. Якарную абмотку можна вызначыць таксама омметрам, дакрануўшыся адным праваднікам ад омметра да калектара, а другім да вывада якарнай абмоткі на шчытку рухавіка.

Рухавікі магутнасцю больш як 1 кВт пускаюцца ў ход з дапамогай пускавога рэастата (рыс. 7.21). Пускавы рэастат складаецца з асобных спіральных супраціўленняў, якія выведзены да металічных кантактаў на ізаляванай пліце. На пліце зманціраваны кантактныя палосы *I*, *II* і пускавая ручка са слізгаючым шчотачным кантактам. Усе пускавыя рэастаты маюць засцярогу ад мінімальных такаў у выглядзе кантактара *КПМ*, а рэастаты, разлічаныя на магутнасць больш як 3,6 кВт, забяспечваюцца максімальнай засцярогай у выглядзе рэле максімальнага току імгненнага дзеяння *РМ*.

Пры пуску рухавіка ручку пускавога рэастата паварочваюць управа з прыпынкам па 2—3 с на кожным кантакце. У момант знаходжання ручкі на кантакце *3* ток з $Л_1$ пойдзе праз кантакт *3*, кантактную шчотку і паласу *I*, катушку кантактара *КПМ*, кантакты S_2 рэле максімальнага току *РМ* у $Л_2$. Пры гэтым замыкаецца кантакт S_1 і ўключаецца абмотка паралельнага ўзбуджэння *Ш*. Акрамя гэтага, ток праз катушку кантактара будзе праходзіць з $Л_1$ праз S_1, дадатковае супраціўленне $R_д$, катушку кантактара *КПМ* і кантакты S_2 рэле *РМ* у $Л_2$. Пры пераводзе ручкі на кантакт *7* уключаецца ўвесь рэастат r_1, r_2,..., r_{10}, якарная абмотка рухавіка і абмотка паслядоўнага ўзбуджэння *С*. Пры далейшым павароце ручкі ўправа рэастат выключаецца і, калі якар прыйдзе ў вярчэнне з намінальнай частатой, ручку ставяць у крайняе правае становішча. Спыненне рухавіка ажыц-



Рыс. 7.21. Схема пускавога рэастата

цяўляецца хуткім паваротам ручкі ўлева. Пры гэтым адключаецца якар рухавіка і шунтуецца катушка кантактара *КПМ*. Кантакт S_1 размыкаецца і адключаецца абмотка паралельнага ўзбуджэння *Ш*. Пры размыканні кантакта S_1 абмотка *Ш* замыкаецца на дадатковае супраціўленне і ўстараняецца з'яўленне ЭРС індукцыі пры разрыве ланцуга ўзбуджэння. Пры памяншэнні напружання ў сетцы больш чым на 25 % намінальнага кантакт S_1 размыкаецца, рухавік спыняецца. Пры павелічэнні току больш за намінальны ў 1,5 раза спрацоўвае рэле *РМ*, пры гэтым кантакт S_2 ланцуга катушкі кантактара *КМП* і кантакт S_1 размыкаюцца, рухавік выключаецца з сеткі.

Для змянення частаты вярчэння рухавіка ў ланцуг абмоткі паралельнага ўзбуджэння ўключаецца рэгулявальны рэастат. Змяненне супраціўлення рэастата вядзе да змянення току, магнітнага патоку, а значыць і частаты вярчэння рухавіка. Пры пуску рухавіка рэгулявальны рэастат поўнасцю выводзіцца, су-

праціўленне мінімальнае, а ток і магнітны паток максімальныя, што забяспечвае плаўны пуск і вялікі вярчальны момант.

Рухавік нагружаецца генератарам пастаяннага току, а нагрузкай генератара з'яўляецца лямпавы або драцяны рэастат.

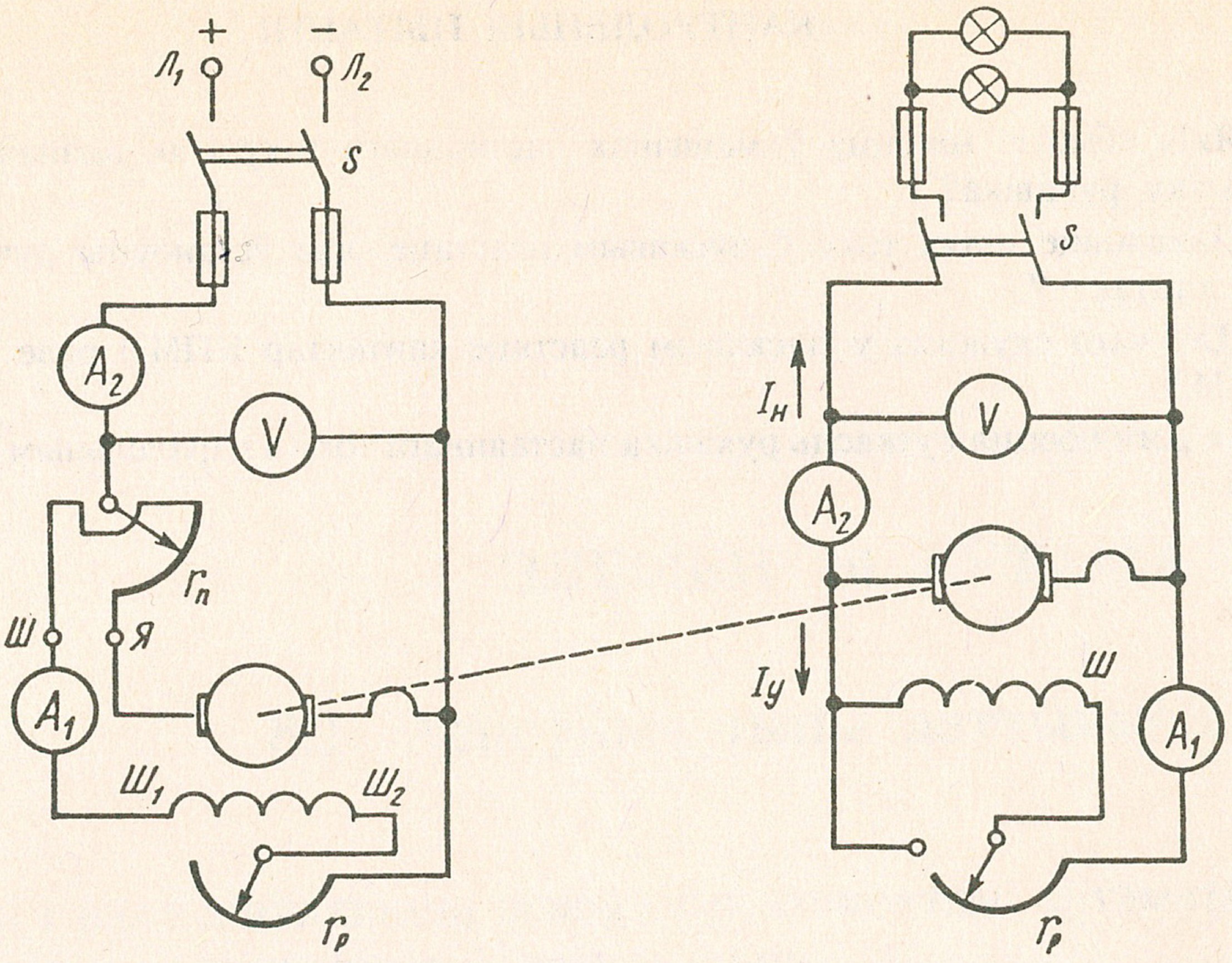
Рабочыя характарыстыкі рухавіка ($n = f(P_2)$, $I_я = f(P_2)$, $М_{э.м} = f(P_2)$ і $\eta = f(P_2)$) паказваюць залежнасць частаты вярчэння n, току якара, электрамагнітнага моманту $М_{э.м}$ і ККД рухавіка ад магутнасці P_2 на валу рухавіка. Магутнасць P_2 на валу рухавіка вызначаецца з раўнання ККД генератара $\eta = P_г / P_2$, дзе $P_г$ — магутнасць, якая аддаецца генератарам: $P_г = U_г I_г$. Ток $I_г$ роўны суме току нагрузкі $I_н$ і току $I_у$ у абмотцы ўзбуджэння ($I_г = I_н + I_у$). Калі ведаць ККД генератара (ён даецца ў пашпарце генератара) і магутнасць, якую аддае генератар $P_г$, то можна вызначыць магутнасць, якую атрымае генератар ад рухавіка $P_2 = P_г / \eta$, а гэта і з'яўляецца магутнасцю на валу рухавіка. ККД рухавіка вызначаецца па формуле $\eta = P_2 / P_1$, дзе P_1 — магутнасць, якая спажываецца рухавіком з сеткі. Частата вярчэння вымяраецца тахометрам. Момант на валу рухавіка $М = P_2 / \omega = P_2 / (2\pi n)$, а $М_{э.м} = М + М_0$, дзе $М_0$ — момант страт халастога ходу, які ў лабараторнай рабоце не ўлічваецца.

Выкананне работы

1. Вывучыце ўстройства машыны пастаяннага току.
2. Вызначце з дапамогай омметра клемы абмотак рухавіка на шчытку і запішыце іх супраціўленне.
3. Вывучыце пускавы рэастат.
4. Збярыце электрычны ланцуг з рухавіком і генератарам пастаяннага току па схеме на рыс. 7.22.
5. Ажыццявіце пуск рухавіка пастаяннага току з дапамогай пускавога рэастата.
6. Здыміце характарыстыку халастога ходу рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем $n = f(I_у)$. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 1.

Табліца 1

Нумар вымярэння	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_у$, мА										
n, аб/с										



Рыс. 7.22. Схема ланцуга для зняцця характарыстык рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем

7. Начарціце графік характарыстыкі халастога ходу рухавіка.

8. Пусціце ў ход рухавік, рэгулявальным рэастатам устанавіце намінальную хуткасць рухавіка і ўзбудзіце генератар да намінальнай ЭРС. Паказанні прыбораў запішыце ў табл. 2.

Т а б л і ц а 2

Рухавік								Генератар						
Вымярэнні				Вылічэнні				Вымярэнні				Вылічэнні		
U, В	I, А	$I_у$, А	n_1, аб/с	P_1, Вт	P_2, Вт	η	M, Н·м	$U_г$, В	$I_н$, А	$I_у$, А	η	$I_г$, А	$P_г$, Вт	P_2, Вт

9. Уключыце нагрузку генератара і паступова павялічвайце яе, запісвайце паказанні прыбораў у табл. 2. Зрабіце 5—7 вымярэнняў. З дапамогай рэгулявальнага рэастата ўстанаўлівайце пастаяннае напружанне на клемах генератара на працягу ўсіх вымярэнняў.

10. Вылічыце неабходныя велічыні, запішыце іх у табл. 2 і начарціце графікі рабочых характарыстык рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Якія абмоткі маюцца ў машынах пастаяннага току і як вызначыць іх клемы на шчытку рухавіка?

2. Пакажыце шлях току ў пускавым рэастаце пры ўстаноўцы ручкі на кантакт *3* і на кантакт *7*.

3. Для чаго служаць у пускавым рэастаце кантактар КПМ і рэле максімальнага току РМ?

4. Як рэгулюецца хуткасць рухавіка пастаяннага току з паралельным узбуджэннем?

8

ЭЛЕМЕНТЫ АЎТАМАТЫКІ

8.1. Асноўныя тыпы датчыкаў і рэле

Датчыкі і рэле з'яўляюцца асноўнымі элементамі аўтаматычных сістэм кантролю, кіравання і рэгулявання.

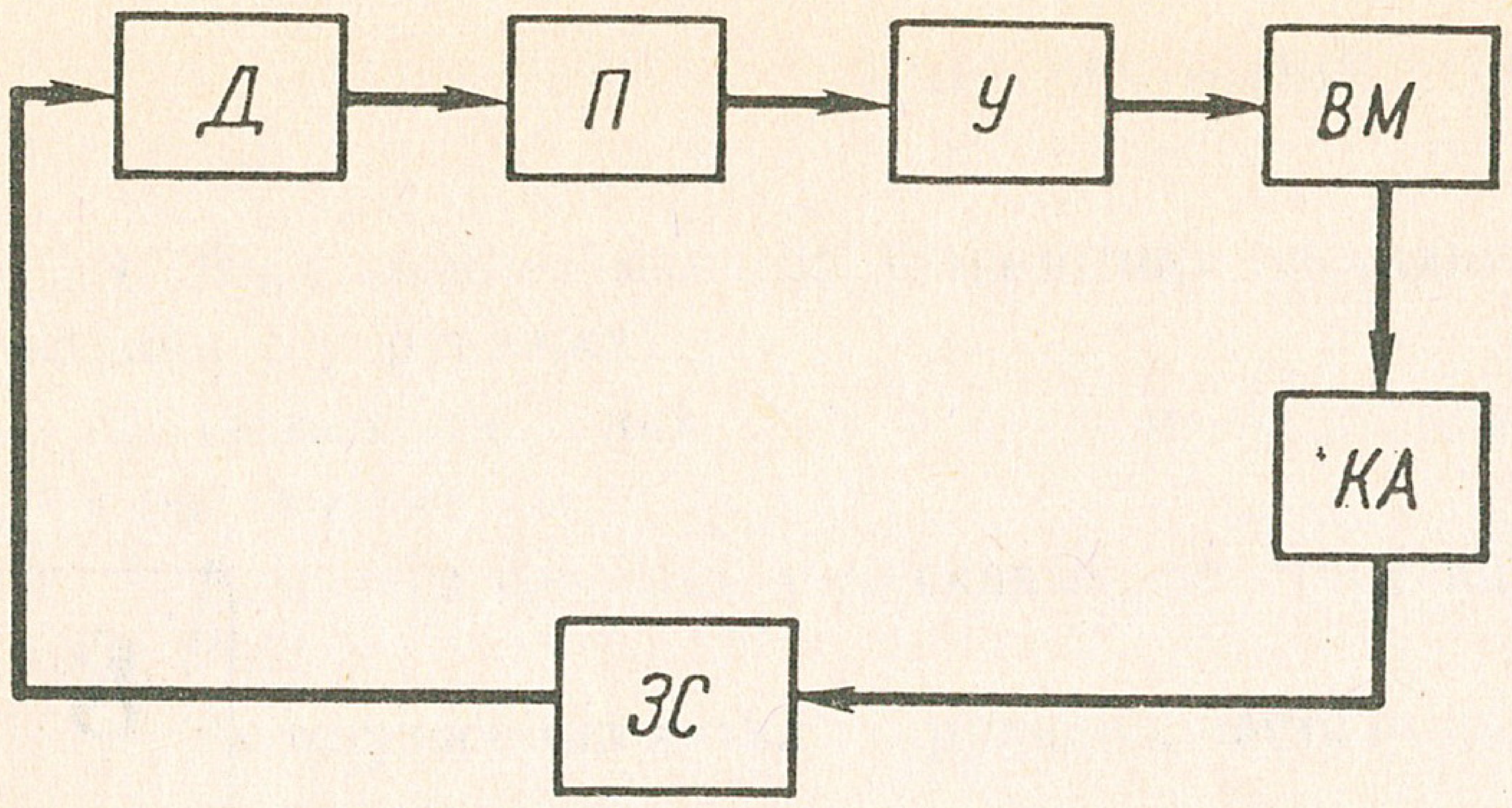
Датчык — адчувальны прыбор, які бесперапынна паказвае ход тэхналагічнага працэсу або рэжым работы ўстаноўкі. У аўтаматычных сістэмах ён бесперапынна атрымлівае розныя сігналы электрычнага і неэлектрычнага характару (павелічэнне або памяншэнне напружання на клемах генератараў, павелічэнне або памяншэнне частаты вярчэння рухавіка, тэмпературы ў печах і парніках, ціску пары, узроўню вады у воданапорнай вежы і г. д.) і рэагуе на іх.

Пры дыстанцыйным кіраванні датчык пераўтварае атрыманы сігнал у электрычны імпульс и пасылае ў выканаўчы механізм. У такім выпадку датчык забяспечваецца пераўтваральнікам і ўзмацняльнікам.

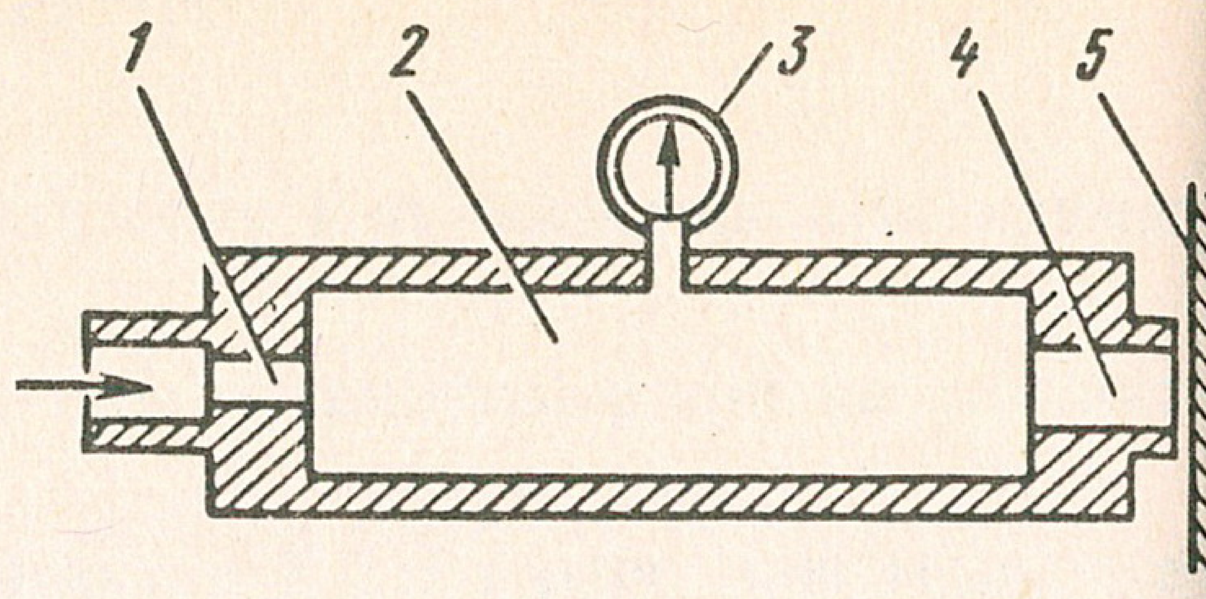
Блок-схема дыстанцыйнага аўтаматычнага кіравання паказана на рыс. 8.1, дзе *Д* — датчык, *П* — пераўтваральнік, *У* — узмацняльнік, *ВМ* — выканаўчы механізм, *КА* — кіруемы аб'ект, *ЗС* — орган зваротнай сувязі.

У датчыках уваходныя велічыні пераўтвараюцца на выхадзе ў механічныя перамяшчэнні цвёрдых цел і газаў, у цеплыню, электрычныя, аптычныя і другія велічыні. У сувязі з гэтым датчыкі падзяляюцца на механічныя, пнеўматычныя, аптычныя і інш.

У простых м е х а н і ч н ы х д а т ч ы к а х выкарыстоўваюцца пругкія ўласцівасці спіральнай спружыны. Уздзеянне знешняга ціску выклікае перамяшчэнне ўказальніка або кантакту, які замыкае або размыкае неабходныя кантакты наступных звенняў сістэмы. У механічных датчыках з біметалічнай пласцінкай змяненне тэмпературы выклікае выгібанне пласцінкі,



Рыс. 8.1. Агульная схема аўтаматычнай сістэмы



Рыс. 8.2. Схема пнеўматычнага датчыка

якая замыкае або размыкае кантакты. У механічных датчыках узроўню вадкасці перамяшчэнне ўказальніка ўзроўню вадкасці звязана з перамяшчэннем паплаўка. У механічных датчыках электрычнага току ток на ўваходзе датчыка пераўтвараецца на выхадзе ў механічныя перамяшчэнні катушкі ў магнітным полі, жалезнага стрыжня ў катушцы, узаемнага перамяшчэння катушак.

П н е ў м а т ы ч н ы д а т ч ы к, які кантралюе змяненне памераў вырабаў па змяненні ціску паветра, адлюстраваны на рыс. 8.2. У камеру *2* праз жыклёр (калібраваную адтуліну) *1* падаецца паветра пры пастаянным ціску. Паветра з камеры праз сопла *4* выходзіць у атмасферу. Перад соплам змяшчаюць паверхню *5*, якую кантралююць. Паміж кантралюемай паверхняй і соплам датчыка ўтвараецца кальцавы зазор. Пры змяненні памераў вырабу кальцавы зазор змяншаецца або павялічваецца і выклікае змяншэнне або павелічэнне ціску паветра ў камеры *2*. Шкала манометра *3*, які ўстаноўлены ў камеры датчыка, градуявана ў лінейных адзінках.

Пнеўматычныя датчыкі з'яўляюцца безкантактнымі, гэта значыць яны непасрэдна не сутыкаюцца з вырабам і могуць быць выкарыстаны для кантролю дэталяў, якія рухаюцца з вялікімі хуткасцямі, і працэсаў, якія адбываюцца пры высокіх тэмпературах.

Э л е к т р ы ч н ы я д а т ч ы к і шырока выкарыстоўваюцца ў аўтаматыцы і тэлемеханіцы, паколькі яны пераўтвараюць змяненні розных фізічных велічынь на ўваходзе ў электрычныя імпульсы на выхадзе датчыка. Электрычныя датчыкі падзяляюцца на параметрычныя і генератарныя.

У п а р а м е т р ы ч н ы х датчыках змяненне ўваходнай велічыні ўплывае на параметры электрычнага ланцуга (супраціўленне, ёмістасць і індуктыўнасць).

Параметрычныя датчыкі маюць пабочную крыніцу току, а ўваходная велічыня ўздзейнічае на супраціўленне, ёмістасць або індуктыўнасць датчыка і змяняе значэнне току, напружанне, час-

тату, фазу току. Параметрычныя датчыкі бываюць амічныя, індуктыўныя і ёмістасныя.

У амічных датчыках змяненне ўваходнай фізічнай велічыні прыводзіць да змянення супраціўлення ланцуга, чым і абумоўліваецца змяненне току або напружання на выхадзе датчыка. Да іх належаць датчыкі рэастатныя, вугальныя, з тэрмасупраціўленнем, паўправадніковыя, электрычныя і газаіонныя.

У індуктыўных датчыках уваходныя велічыні змяняюць індуктыўнасць прыбора, што прыводзіць да змянення індукцыйнага супраціўлення, а значыць, і току або напружання на выхадзе датчыка.

У ёмістасных датчыках уваходныя велічыні змяняюць іх ёмістасць, што прыводзіць да змянення ёмістаснага супраціўлення, а значыць, і току або напружання на выхадзе датчыка.

Ёмістасны датчык вуглавых перамяшчэнняў звязваецца са змяненнем плошчы пласцін кандэнсатара, а лінейных перамяшчэнняў — са змяненнем прамежку паміж пласцінамі або з перамяшчэннем дыэлектрыка.

Ёмістасныя датчыкі служаць для вымярэння вільготнасці матэрыялаў. Павелічэнне вільготнасці матэрыяла павялічвае яго дыэлектрычную пранікальнасць і ёмістасць кандэнсатара ўзрастае. Ёмістасныя датчыкі шырока выкарыстоўваюцца ў сельскай гаспадарцы для вызначэння вільготнасці зерня.

У генератарных датчыках уваходная велічыня непасрэдна пераўтвараецца ў ЭРС і ў выніку гэтага знікае неабходнасць у пабочных крыніцах электрычнай энергіі.

Генератарныя датчыкі падзяляюцца на індукцыйныя, тэрма-, п'еза- і фотаэлектрычныя.

У індукцыйных датчыках выкарыстоўваюцца закон электрамагнітнай індукцыі, які звязвае хуткасць руху з ЭРС індукцыі. Гэтыя датчыкі па прынцыпу дзеяння аналагічныя генератарам.

У тэрмаэлектрычных датчыках выкарыстоўваецца з'ява кантактнай розніцы патэнцыялаў двух разнародных металаў (канстантану, манганіну, ніхрому і інш.). Для атрымання ЭРС на канцах двух разнародных праваднікоў неабходна, каб іх кантакты мелі розныя тэмпературы. Значэнне тэрмаЭРС прапарцыйна рознасці тэмператур спаяў тэрмаэлемента. Калі захаваць пастаяннай тэмпературу аднаго спаю тэрмаэлемента, то можна па значэнні тэрмаЭРС меркаваць аб тэмпературы другога спаю, гэта значыць вымяраць тэмпературу. У тэрмаэлектрычных

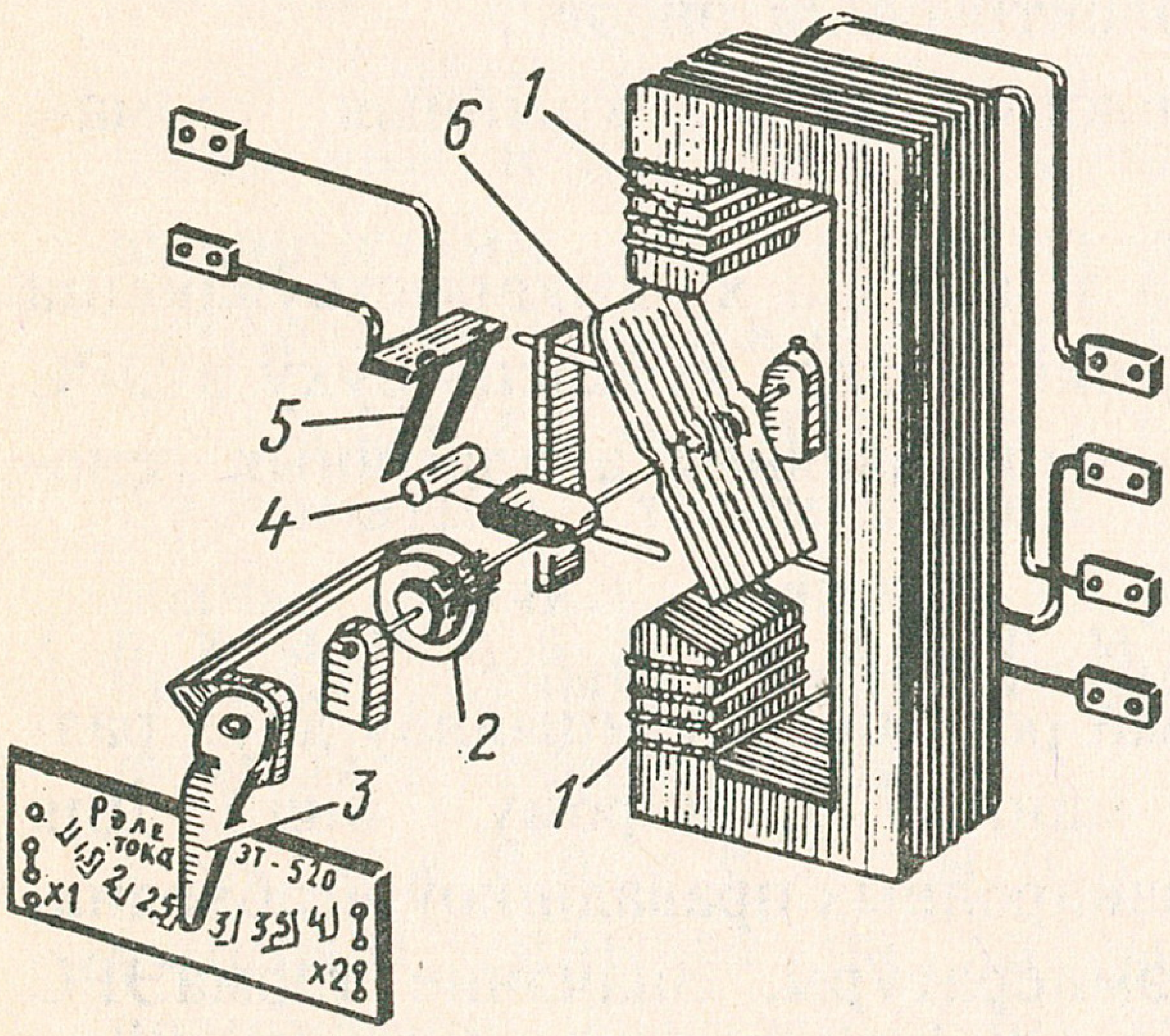
датчыках тэмпература непасрэдна пераўтвараецца ў тэрмаЭРС без пабочных крыніц электраэнергіі.

У п'езаэлектрычных датчыках выкарыстоўваецца п'езаэлектрычны эфект некаторых крышталяў (кварцу і сегнетаэлектрыка), з'яўленне электрычных зарадаў на паверхні крышталяў пры іх сцісканні. П'езаэлектрычныя датчыкі прымяняюцца для кантролю хуткапрацякаючых дынамічных працэсаў (ціску газаў у цыліндрах рухавікоў унутранага згарання, гукавых ваганняў і інш.).

Фотаэлектрычны датчык уяўляе сабой фотаэлемент. Кантралюемы выраб або тэхналагічны працэс тым або іншым шляхам уздзейнічае на светлавы паток, які падае на фотаэлемент, і змяняе колькасць выбітых з катода электронаў, а значыць і ток у ланцугу.

Рэле — гэта адчувальны прыбор, які ў адрозненне ад датчыка спрацоўвае (уключае або адключае ланцуг), калі ўваходная велічыня дасягае пэўнага значэння. У залежнасці ад прызначэння рэле падраздзяляюцца на рэле напружання, рэле току, цеплавыя рэле, фотарэле, рэле часу і інш. Рэле, якія спрацоўваюць пры ўзрастанні кантралюемай велічыні вышэй за намінальнае значэнне, называюцца *максімальнымі*; рэле, якія спрацоўваюць пры змяншэнні кантралюемай велічыні ніжэй за намінальнае значэнне, — *мінімальнымі*.

Усякае рэле складаецца з ланцуга, які ўспрымае ўздзеянне фізічнай велічыні, і ланцуга, які выконвае пэўнае дзеянне, — ланцуга аператыўнага току. Ланцуг, які ўспрымае дзеянне, атрымлівае сігнал у выглядзе павышэння або паніжэння напружання, узрастання або ўбывання току ніжэй зазначанай мяжы, пры гэтым рэле спрацоўвае і замыкае ланцуг аператыўнага току, які выконвае тую або іншую функцыю: уключэнне, пераключэнне або адключэнне рухавіка або іншай электраўстаноўкі.



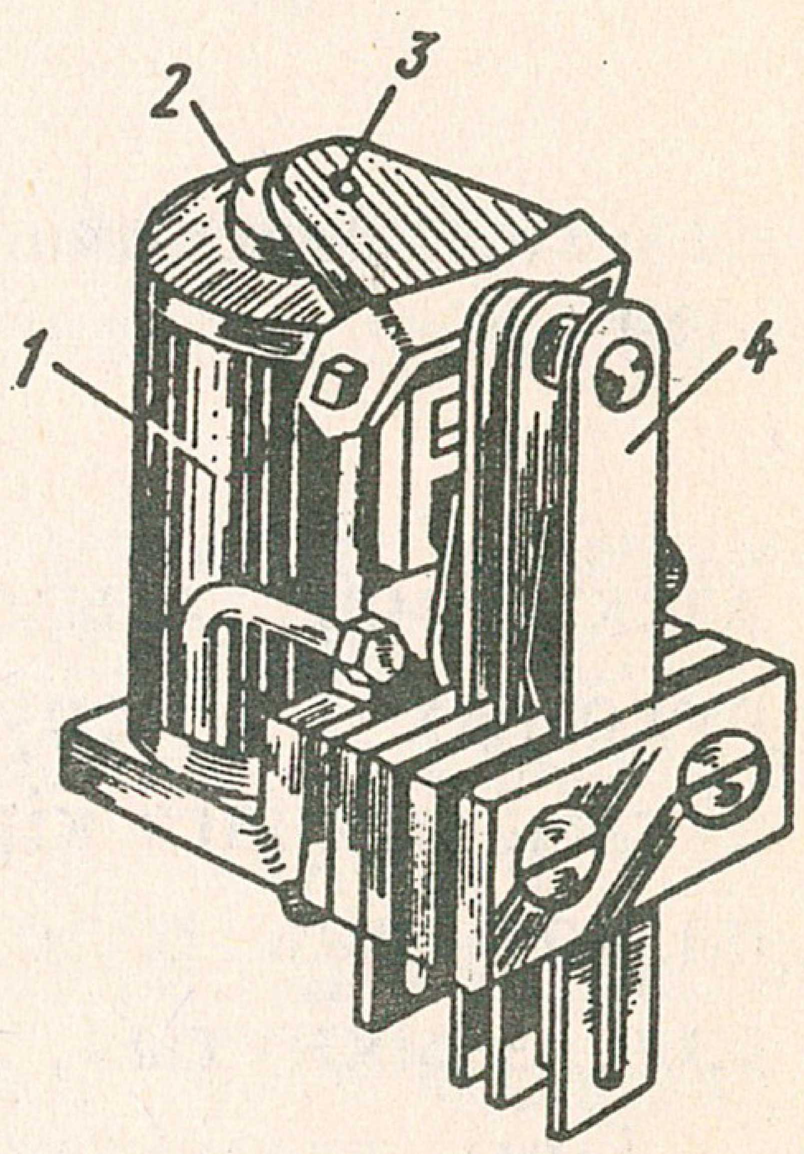
Рыс. 8.3. Схема рэле максімальнага току ЭТ-521

У рэле максімальнага току (рыс. 8.3) токавая абмотка *1* уключаецца ў сетку. Пры аварыі або перагрузцы ў сетцы па гэтай абмотцы пойдзе вялікі ток. У гэ-

тым выпадку стальны якар *6* мацней намагнічваецца і размяшчаецца ўздоўж магнітных сілавых ліній. Пры павароце якара ўправа рухомы кантакт *4* замыкае нерухомыя кантакты *5*. Пры гэтым ланцуг aператыўнага току замыкаецца, уключаюцца сродкі сігналізацыі (званок, светлавое табло) або прыводзіцца ў дзеянне выканаўчы механізм, які адключае аварыйны ўчастак ланцуга.

Значэнне току спрацоўвання рэле рэгулюецца закручваннем спіральнай спружыны *2*, якая знаходзіцца на адной восі з якарам. Ток спрацоўвання рэле ўстанаўліваецца на шкале ўказальнікам *3*. Токавая абмотка рэле мае чатыры вывады. Пры замыканні першай клемы з другой і трэцяй з чацвёртай абедзве секцыі токавай абмоткі ўключаюцца ў ланцуг паралельна і пастаянная шкалы падвойваецца.

Шырокае распаўсюджанне ў практыцы атрымалі хуткадзейныя электрамагнітныя рэле максімальнага току (рыс. 8.4). Токавая абмотка *1* рэле ўключаецца паслядоўна ў ланцуг. Пры павелічэнні току вышэй за намінальны якар *3* прыцягваецца да стрыжня *2*. Пры гэтым якар паварочваецца супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі і замыкае кантакты *4* aператыўнага току, якія прыводзіць у дзеянне сродкі сігналізацыі або выканаўчы механізм электрапрывада. Гэтыя электрамагнітныя рэле з'яўляюцца хуткадзейнымі і служаць для засцярогі электрычных ланцугоў пры кароткім замыканні.



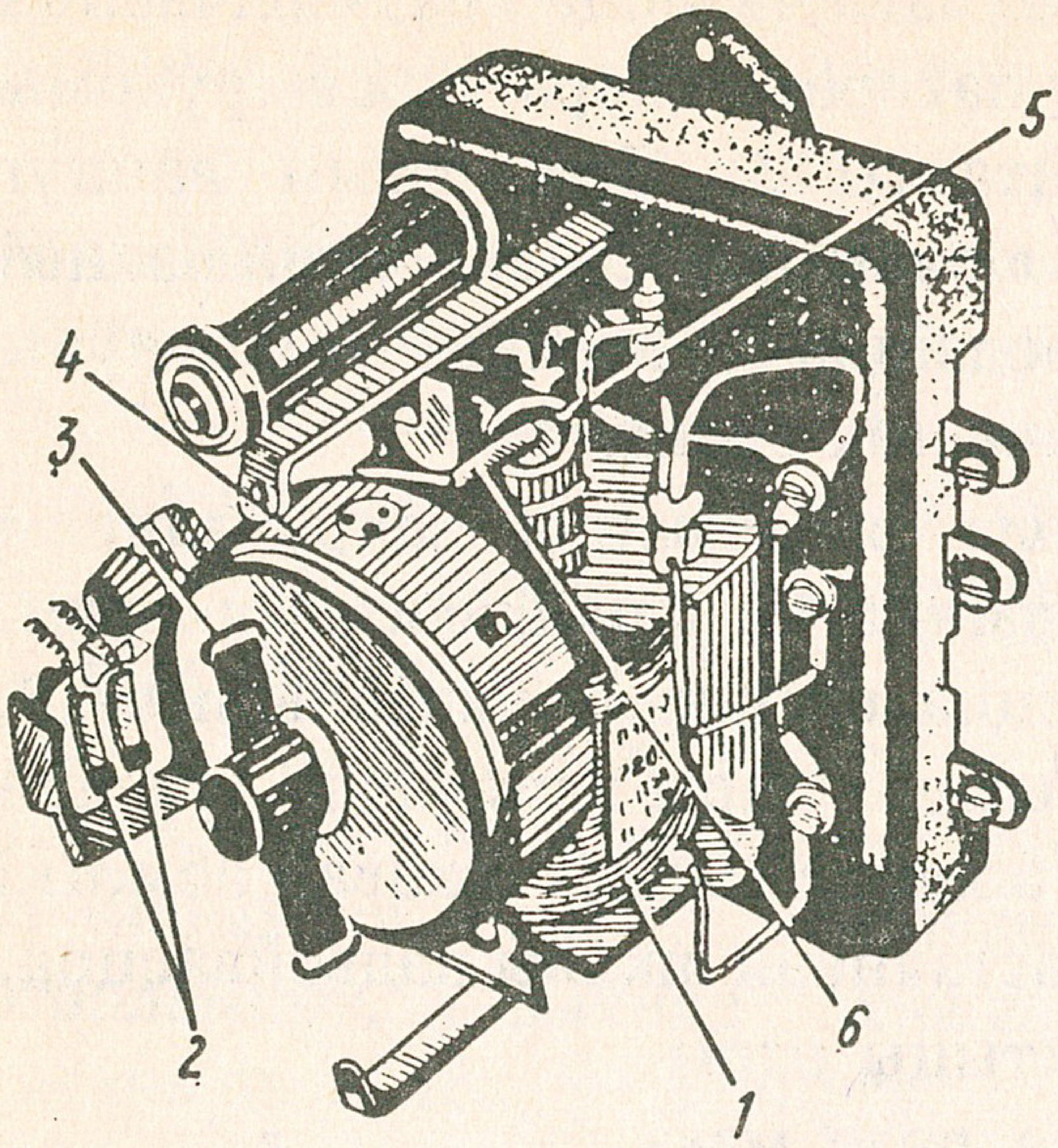
Рыс. 8.4. Схема электрамагнітнага рэле максімальнага току

Рэле мінімальнага току ўключаецца ў ланцуг узбуджэння рухавіка пастаяннага току і спрацоўвае пры памяншэнні току ніжэй за гранічны, што забяспечвае кантроль за частатой вярчэння рухавіка.

Рэле зваротнага току выкарыстоўваецца пры ўключэнні генератараў на паралельную работу і спрацоўвае пры змяненні напрамку току, значыць, калі генератар пераходзіць у рэжым рухавіка. У гэты момант рэле спрацоўвае і аўтаматычна адключае яго з сеткі. Для захавання вытрымкі часу паміж уключэннем рэле і яго спрацоўваннем прымяняецца рэле часу.

Рэле часу адлюстравана на рыс. 8.5. Пры праходжанні току па катушцы *1* якар *5* уцягваецца ў катушку і вызваляе ўпор *6* гадзіннікавага механізму *4*. Пры гэтым уключаецца гадзіннікавы механізм, рычаг з рухомым кантактам *3* паварочваецца ўлева да сустрэчы з нерухомымі кантактамі *2* і рэле спрацоўвае. Час спрацоўвання рэле залежыць ад устаноўкі нерухомых кантактаў па шкале гадзіннікавага механізму.

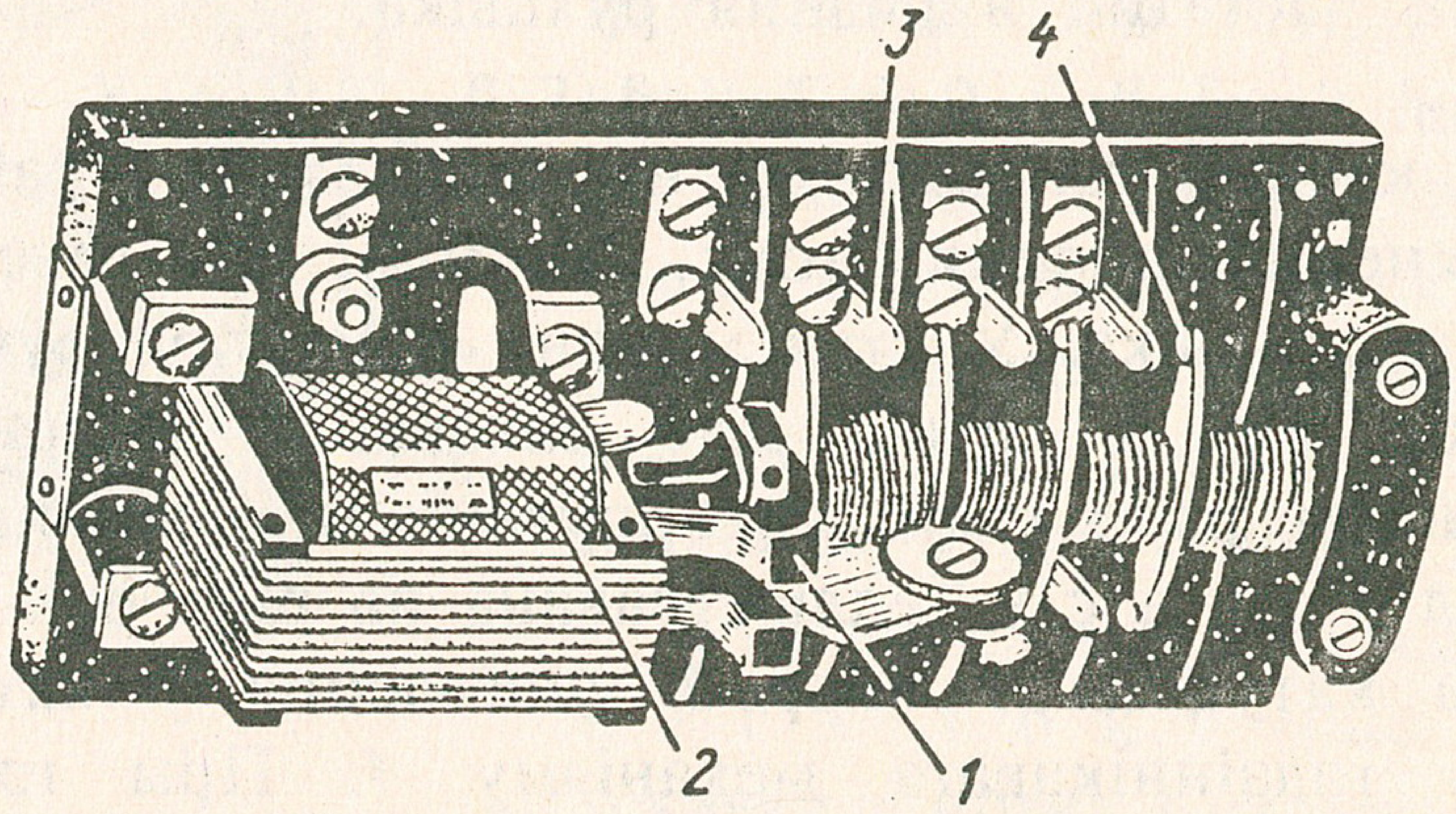
Рэле мінімальнага напружання з'яўляецца хуткадзейным магнітным рэле. Катушка рэле мінімальнага напружання падключаецца ў ланцуг паралельна электрасілавой устаноўцы. Пры кароткім замыканні ланцуга або аварыйнай нагрузцы напружанне на дадзеным участку ланцуга падае. Пры паніжэнні напружання ток у катушцы рэле зменшыцца, і пры гэтым якар пад дзеяннем спружыны адхіліцца ад стрыжня катушкі і замкне кантакты аператыўнага току, які адключыць электрасілавую ўстаноўку.



Рыс. 8.5. Электрамагнітнае рэле часу ЭЧ-133

Прамежкавае рэле (рыс. 8.6) таксама з'яўляецца электрамагнітным рэле і складаецца з токавай катушкі *2*, якара *1*, рухомых *4* і нерухомых *3* кантактаў. Прамежкавае рэле ў сістэме аўтаматычнага кіравання з'яўляецца выканаўчым механізмам. Калі па катушцы рэле не праходзіць ток, то адны нерухомыя кантакты рэле замкнутыя, а другія могуць быць разамкнутымі.

Пры праходжанні току па катушцы *1* якар *2* уцягваецца ў катушку. Пры гэтым замкнутыя кантакты размыкаюцца, а нармальна разамкнутыя кантакты замыкаюцца, гэта значыць адны ланцугі адключаюцца, а другія ўключаюцца.



Рыс. 8.6. Прамежкавае рэле ЭП-41

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх асноўных элементаў складаецца аўтаматычная сістэма?
2. Што называецца датчыкам? Як яны падзяляюцца?
3. Якія электрычныя датчыкі называюцца параметрычнымі?
4. Што называецца рэле?
5. Як устроена рэле максімальнага току?

8.2. Аўтаматычны кантроль, кіраванне і рэгуляванне

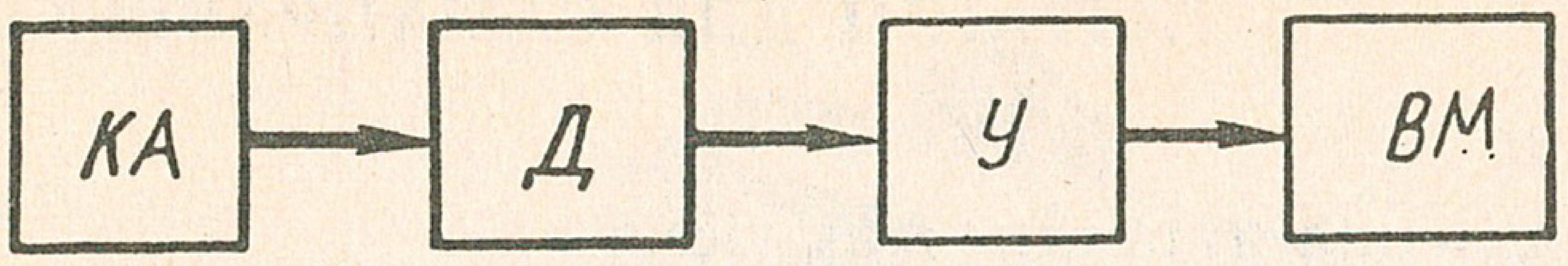
Аўтаматызацыя — гэта выкананне ўсіх тэхнічных і тэхналагічных аперацый машынамі і апаратамі без непасрэднага ўдзелу чалавека.

Аўтаматызацыя вытворчасці з'яўляецца асновай павышэння прадукцыйнасці працы і якасці прадукцыі. Машыны і апараты могуць выканаць вымярэнні з большай ступенню дакладнасці і значную колькасць аперацый у адзінку часу. Акрамя гэтага, машыны і апараты могуць выконваць розныя аперацыі ў складаных умовах: пры высокіх і нізкіх тэмпературах, у асяроддзях з ядавітымі вадкасцямі і газамі, у вакууме і касмічнай прасторы. Усё гэта дае магчымасць з дапамогай аўтаматызацыі ажыццявіць больш поўны і ўсебаковы кантроль за якасцю прадукцыі, за вытворчымі працэсамі, за змяненнем фізічных велічынь, а таксама больш аператыўна ажыццяўляць кіраванне тэхналагічнымі працэсамі.

Аўтаматызацыя ўключае аўтаматычны кантроль, кіраванне і рэгуляванне.

Аўтаматычны кантроль — гэта бесперапынны кантроль за тэхнічным і тэхналагічным працэсамі, за якасцю прадукцыі і за змяненнем кантралюемых велічынь. Часта аўтаматы, якія вядуць кантроль, забяспечваюцца стрэлачнымі ўказальнікамі або самапішучымі прыстасаваннямі, якія даюць магчымасць назіраць за змяненнем кантралюемай велічыні. Аўтаматычна кантралююцца ціск пары ў катлах, тэмпература ў печах, узровень бензіну ў баку, тэмпература вады ў абалонцы ахалоджвання галоўкі рухавіка аўтамабіля і інш.

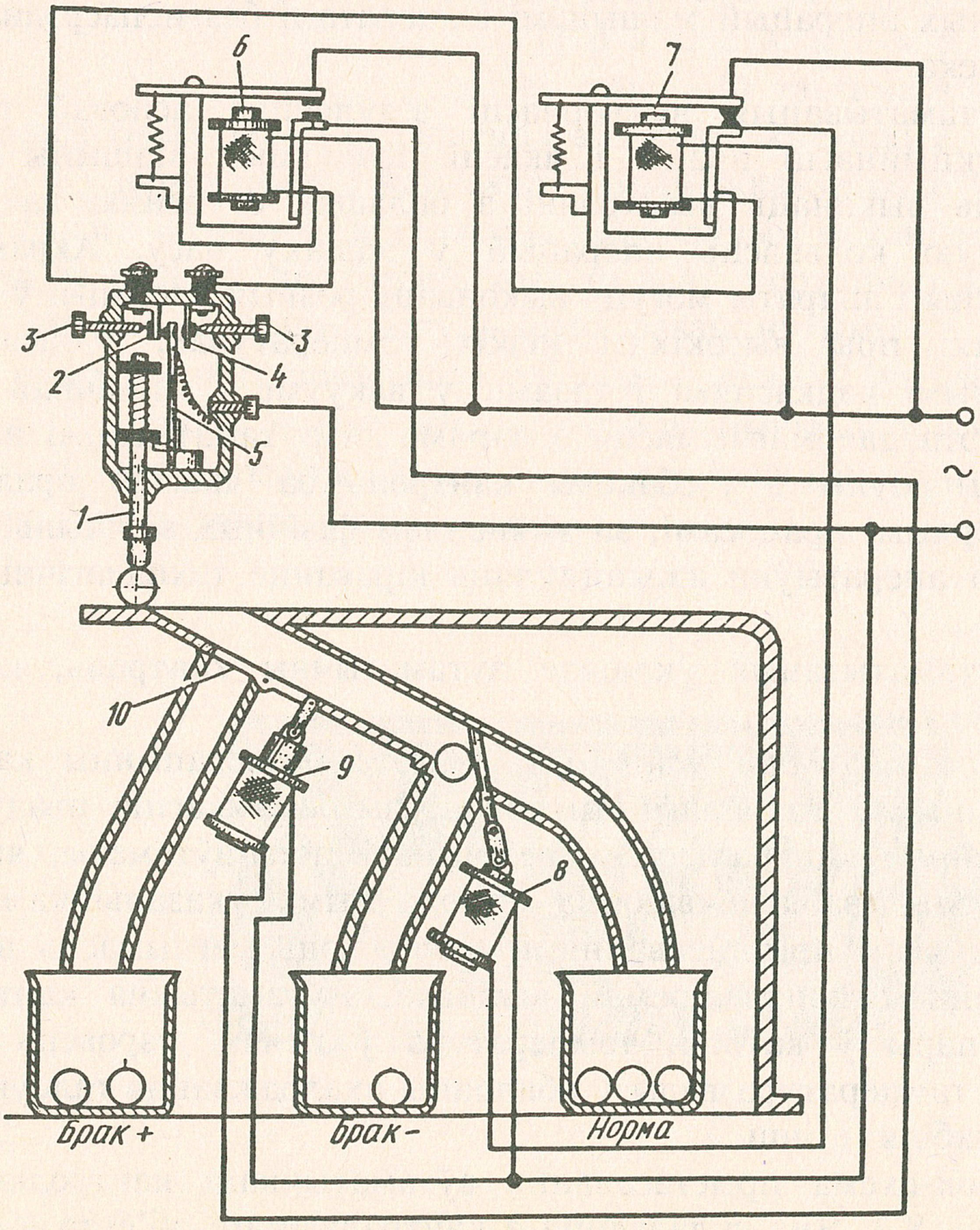
Блок-схема прыстасавання аўтаматычнага кантролю паказана на рыс. 8.7. Яна складаецца з кантралюемага аб'екта *КА*, датчыка *Д*, узмацняльніка *У* і выканаўчага (вымяральнага) механізму *В*.



Рыс. 8.7. Блок-схема аўтаматычнага кантролю

Змяненні ў кантралюемым аб'екце рэгіструюцца датчыкам (змяненне тэмпературы ў печах выклікае з'яўленне ЭРС у тэрмапары, змяненне ўзроўню бензіну ў баку — змяненне супраціўлення рэастата і току ў ланцугу). Сігналы датчыка перадаюцца непасрэдна або пасля ўзмацнення вымяральнаму (выканаўчаму) механізму, шкала якога праградуявана ў адзінках кантралюемай велічыні.

Схема аўтаматычнага кантролю памераў шарыкаў для падшыпнікаў паказана на рыс. 8.8. Рэгулюемымі вінтамі *3* аўтамат устанаўліваецца на пэўны памер шарыкаў. Шарык павялічанага памеру падымае штурхач *1* уверх. Пры гэтым рухомы кантакт *5* замыкаецца з нерухомым правым кантактам *4*, які ўключае ў сетку прамежкавае рэле *6* папраўнага брака. Рэле спрацоўвае і ўключае ў сетку адбракоўны электрамагніт папраўнага браку,

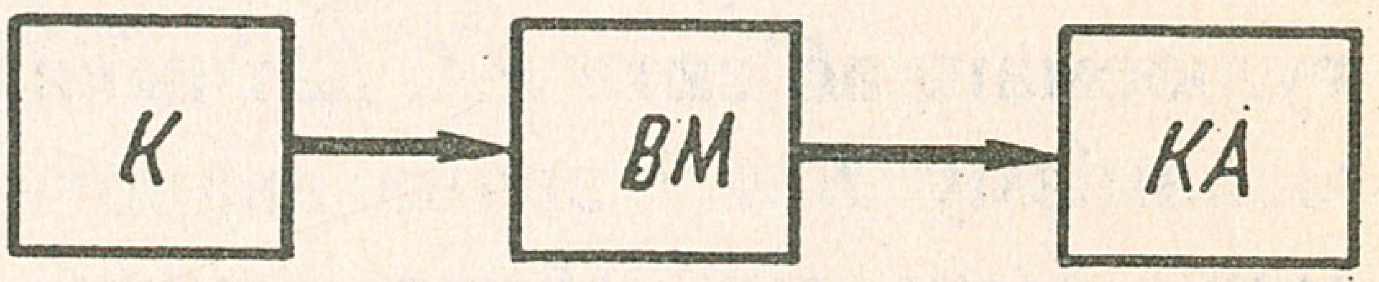


Рыс. 8.8. Схема аўтаматычнага кантролю памераў шарыкаў для падшыпнікаў

пры гэтым стрыжань электрамагніта ўцягваецца, заслонка *10* падымаецца і шарык падае ў левы бункер. Калі памер шарыка меншы за стандартны, штурхач *1* апускаецца і замыкае рухомы кантакт *5* з нерухомым левым кантактам *2*, уключае ў сетку прамежкавае рэле *7* непапраўнага браку. Яно ў сваю чаргу ўключае ў сетку адбракоўны электрамагніт *8* непапраўнага браку і шарык падае ў сярэдні бункер.

Істотным недахопам кантактнага метаду аўтаматычнага кантролю з'яўляецца зношванне кантактаў. Гэты метад нельга выкарыстаць для кантролю вырабаў, якія хутка рухаюцца, і працэсаў, якія працякаюць пры высокіх тэмпературах. Бескантактны аўтаматычны кантроль ажыццяўляецца з дапамогай пнеўматычных, аптычных і індукцыйных датчыкаў.

Фотаэлектронныя метады кантролю прымяняюцца для кантролю тонкіх, крохкіх і мяккіх вырабаў, а таксама празрыстых вадкасцяў і раствораў. Кантралюемы прадмет размяшчаецца паміж крыніцай святла і фотаэлементам. Змяненне светлавога патоку выклікае змяненне фотатоку ў ланцугу фотаэлемента. Па значэнні фотатоку можна меркаваць аб памерах цвёрдых празрыстых прадметаў і аб канцэнтрацыі раствораў. У практыцы знайшлі шырокае прымяненне аўтаматы з фотаэлементамі для падліку прадметаў, якія рухаюцца (фоталічыльнікі).

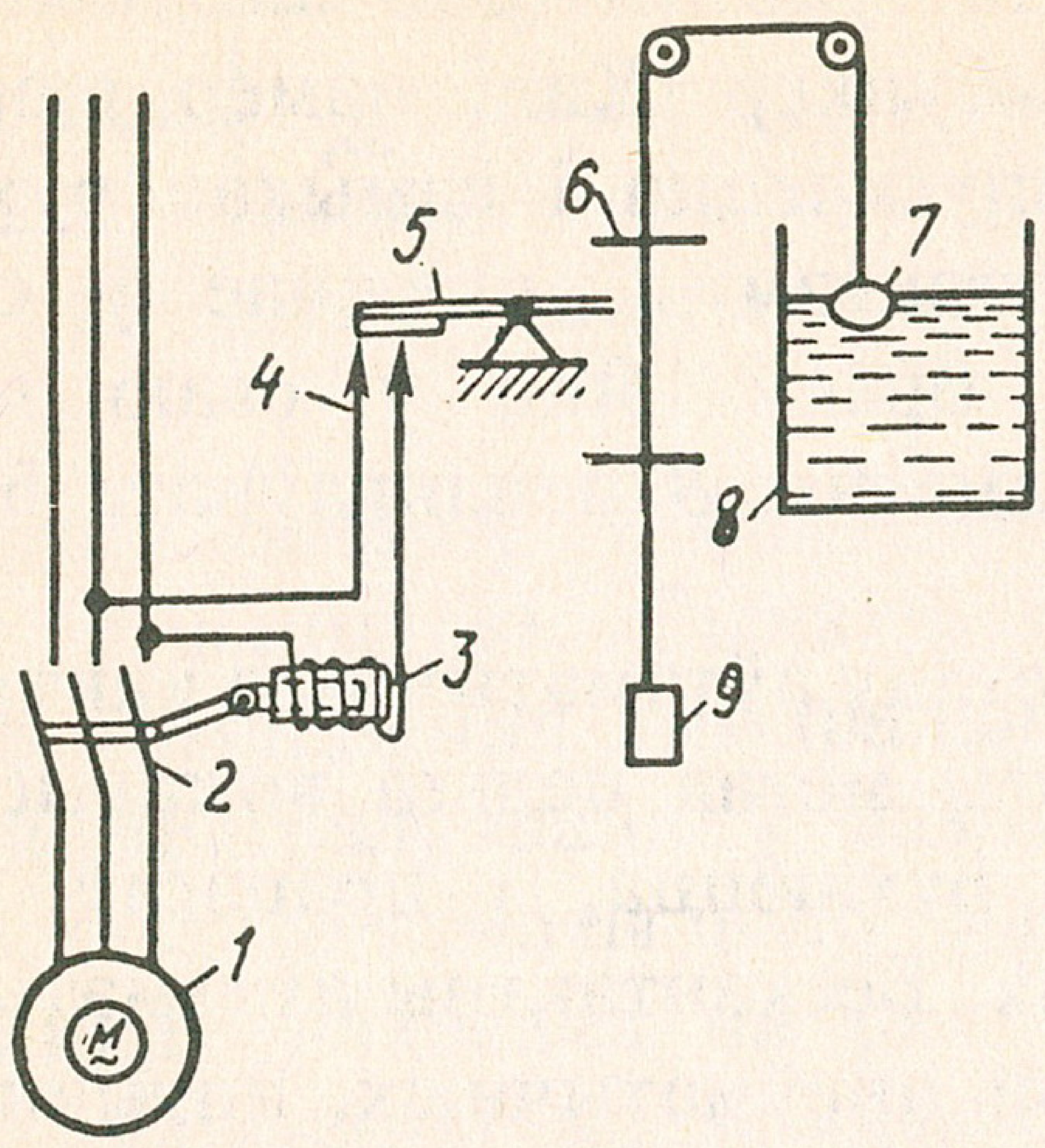


Рыс. 8.9. Блок-схема аўтаматычнага кіравання

Блок-схема аўтаматычнага кіравання прадстаўлена на рыс. 8.9. Устройства аўтаматычнага кіравання складаецца з органа кіравання *K*, выканаўчага механізму *BM* і кіруемага аб'екта *KA*.

Самай простай формай кіравання з'яўляецца ўключэнне і адключэнне кіруемага аб'екта. Гэту форму аўтаматычнага кіравання можна прадэманстраваць пры ўключэнні ў сетку асінхроннага рухавіка з дапамогай магнітнага пускальніка з кнопачнай станцыяй і аўтаматычнага адключэння яго цеплавым рэле пры перагрузцы рухавіка.

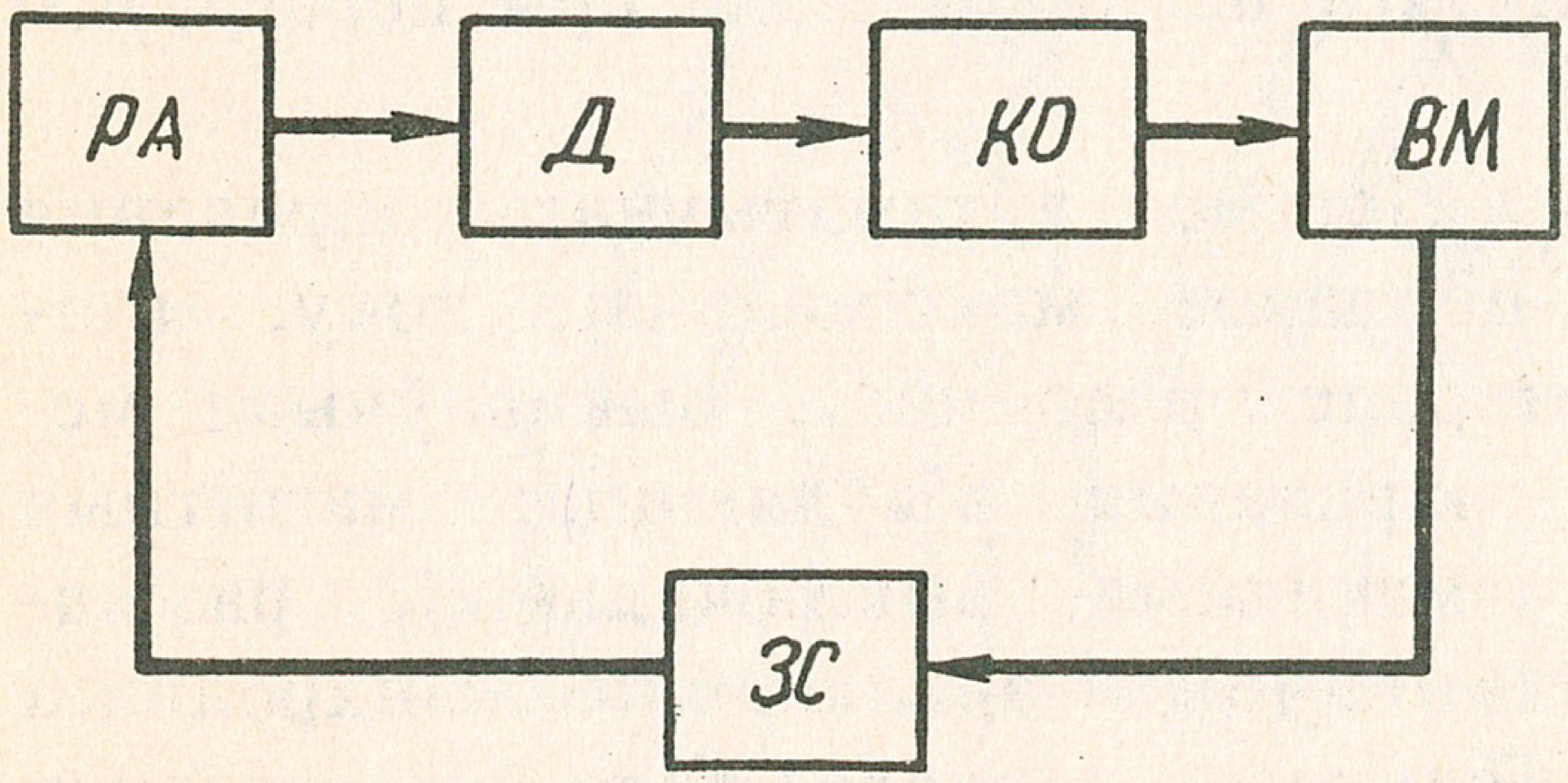
Органамі кіравання ў сістэме аўтаматычнага кіравання з'яўляюцца розныя рэле: цеплавое, максімальнага току, мінімальнага напружання, фотарэле, рэле часу. Выканаўчымі механізмамі аўтаматычнага кіравання з'яўляюцца: магнітныя пускальнікі, кантактары, масляныя выключальнікі, раз'households нальнікі і інш. Пры аўтаматычным адключэнні асінхроннага рухавіка органам кіравання служыць цеплавое рэле, выканаўчым механізмам — магнітны пускальнік, а кіруемым аб'ектам — электрарухавік.



Рыс. 8.10. Схема аўтаматычнага кіравання электрарухавіком насоснай станцыі

Простай формай аўтаматычнага кіравання з'яўляецца ўключэнне або адключэнне электрапрывада машыны або ўстаноўкі. Прыкладам такога кіравання можа служыць аўтаматычнае кіраванне электрарухавіком насоснай станцыі (рыс. 8.10). Пры напаўненні бака *8* воданапорнай вежы вадой паплавок *7* будзе падымацца ўверх, а грузік *9* апускацца ўніз. У момант напаўнення бака да зададзенага ўзроўню верхні ўпор *6* націсне рычаг *5*, левае плячо рычага падымецца і разамкне кантакты *4*. Электрамагніт *3* пры гэтым выключыцца, а рубільнік *2* аўтаматычна адключыць рухавік *1*. Падача вады спыніцца. Калі ўзровень вады ў баку зменшыцца і паплавок апусціцца, упор націсне на рычаг знізу і замкне кантакт. Электрамагніт замкне рубільнік і ўключыць электрарухавік. Падача вады ў воданапорны бак аднавіцца.

Блок-схема аўтаматычнага рэгулявання прадстаўлена на рыс. 8.11. Устройства аўтаматычнага рэгулявання складаецца з рэгулюемага аб'екта *РА*, датчыка *Д*, кіруемага органа *КО*, выканаўчага механізму *ВМ* і звяна зваротнай сувязі *ЗС*. Рэгулюемым аб'ектам можа быць які-небудзь працэс або фізічная велічыня (ціск, тэмпература, напружанне, хуткасць і інш.). Адхіленне вытворчага працэсу ад нармальнага рэжыма работы або змяненне фізічнай велічыні дзейнічаюць на датчык. Датчык пасылае сігнал кіруючаму органу, які ўздзейнічае на выканаўчы механізм. Выканаўчы механізм праз звяно зваротнай сувязі прыводзіць рэгулюемы аб'ект у нармальны рэжым работы або велічыню, якая змянілася да ранейшага значэння.



Рыс. 8.11. Блок-схема аўтаматычнага рэгулявання

Блок-схема аўтаматычнага рэгулявання ўяўляе сабой замкнутую сістэму. Блок-схемы аўтаматычнага кантролю і кіравання ў адрозненне ад схемы аўтаматычнага рэгулявання называюць *разамкнутымі.*

Аўтаматычнае рэгуляванне з'яўляецца больш

складаным працэсам, ён уключае кантроль і кіраванне. Схема аўтаматычнага рэгулявання напружання генератара прадстаўлена на рыс. 6.32.

Аўтаматычныя сістэмы кантролю, кіравання і рэгулявання знайшлі шырокае прымяненне ў вытворчасці.

ПЫТАННІ І ЗАДАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца аўтаматызацыяй?
2. Якія асноўныя аперацыі ўключае аўтаматызацыя?
3. Што называецца аўтаматычным кантролем і з якіх элементаў складаецца ўстройства аўтаматычнага кантролю?
4. Што называецца аўтаматычным кіраваннем і з якіх элементаў складаецца ўстройства аўтаматычнага кіравання?
5. Прывядзіце прыклады аўтаматычнага кіравання.
6. Што называецца аўтаматычным рэгуляваннем і з якіх элементаў складаецца ўстройства аўтаматычнага рэгулявання?
7. Прывядзіце прыклады аўтаматычнага рэгулявання.

ЛАБАРАТОРНАЯ РАБОТА 16

Даследаванне сістэмы токавай засцярогі з вытрымкай часу

М э т а р а б о т ы: вывучыць у дзеянні рэле максімальнага току, рэле часу і прамежкавае рэле, навучыцца збіраць ланцуг токавай засцярогі з вытрымкай часу.

Пры выкананні лабараторнай работы студэнт павінен вывучыць устройства і дзеянне рэле максімальнага току, рэле часу, прамежкавага рэле і рэле паўторнага ўключэння, сабраць электрычны ланцуг токавай засцярогі з вытрымкай часу і выпрабаваць яго ў дзеянні.

Тэарэтычныя звесткі

Вывучыце § 8.1 і 8.2 падручніка. Па меры росту магутнасці электрычных установак і ўскладнення іх схем камутацыі ў якасці ахоўнага ўстройства прымяненне плаўкіх засцерагальнікаў стала

недастатковым, у сілу чаго ўзніклі ахоўныя ўстройствы, якія атрымалі назву рэлейнай засцярогі. Прызнакам з'яўлення кароткага замыкання або перагрузкі можа служыць узрастанне ў ланцугу току, паніжэнне напружання і змяншэнне супраціўлення ахоўнага ўчастка. Адпаведна гэтаму прымяняюць токавыя рэле, рэле напружання, рэле супраціўлення. Указаныя рэле з'яўляюцца асноўнымі. Да ліку дапаможных належаць рэле часу, прамежкавыя рэле і рэле паўторнага ўключэння.

У дадзенай рабоце трэба даследаваць электрамагнітнае рэле максімальнага току ЭТ-52, рэле часу ЭВ-133, прамежкавае рэле ЭП-41.

Умовай пачатку дзеяння рэле максімальнага току (гл. рыс. 8.3) з'яўляецца роўнасць момантаў:

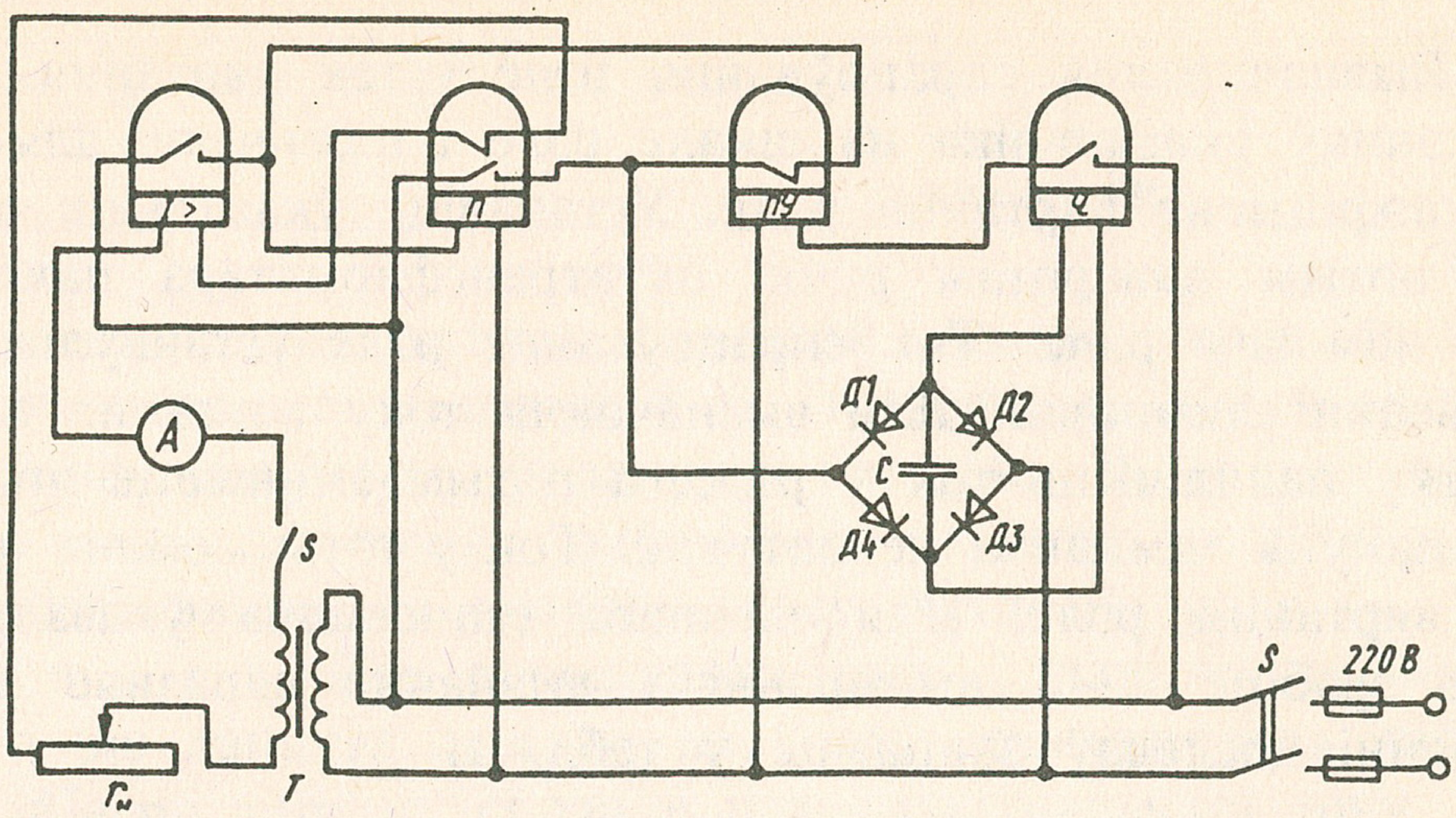
$$M_я = M_п + M_т ,$$

дзе $M_я$ — вярчальны момант якара; $M_п$ — процідзейны момант спружыны; $M_т$ — момант сілы трэння.

Для спрацоўвання рэле неабходна, каб яго вярчальны момант перавышаў момант процідзейнай спружыны і момант сілы трэння. Найменшы ток, пры якім спрацоўвае рэле, называецца *токам спрацоўвання* і абазначаецца $I_с$. Пры змяншэнні току ў ланцугу (у абмотках рэле) якар пад дзеяннем процідзейнай спружыны *5* паварочваецца ўлева і размыкае нерухомыя кантакты *3*.

Найбольшы ток рэле, пры якім яго якар вяртаецца ў пачатковае становішча, называецца *токам вяртання рэле* і абазначаецца $I_в$. Стасунак токаў $I_в/I_с = k$ называецца *каэфіцыентам вяртання*. Чым меншая розніца паміж токамі $I_в$ і $I_с$, тым большы (лепшы) каэфіцыент вяртання (k). Надзейнае замыканне кантактаў і адсутнасць іскравання паміж рухомымі і нерухомымі кантактамі забяспечваюцца вырабам спружынных кантактаў і канструкцый магнітапровада.

Рэле часу служыць для штучнага замаруджвання дзеянняў ва ўстройствах рэлейнай засцярогі і электрааўтаматыкі. Час, які праходзіць з моманту падачы напружання на абмотку рэле часу да замыкання яго кантактаў, называецца *вытрымкай часу засцярогі*. Рэле часу павінна надзейна спрацоўваць з 80 % намінальнага напружання. Для гатоўнасці да паўторнага дзеяння рэле часу павінна мець імгненны зварот пасля адключэння яго катушкі ад крыніцы апаратыўнага току. Для вывучэння сістэмы рэлейнай засцярогі з вытрымкай часу збіраюць ланцуг з уключэннем рэле максімальнага току $I >$, рэле часу *Ч*, прамежкавага рэле *П* і рэле паўторнага ўключэння *ПУ* (рыс. 8.12).

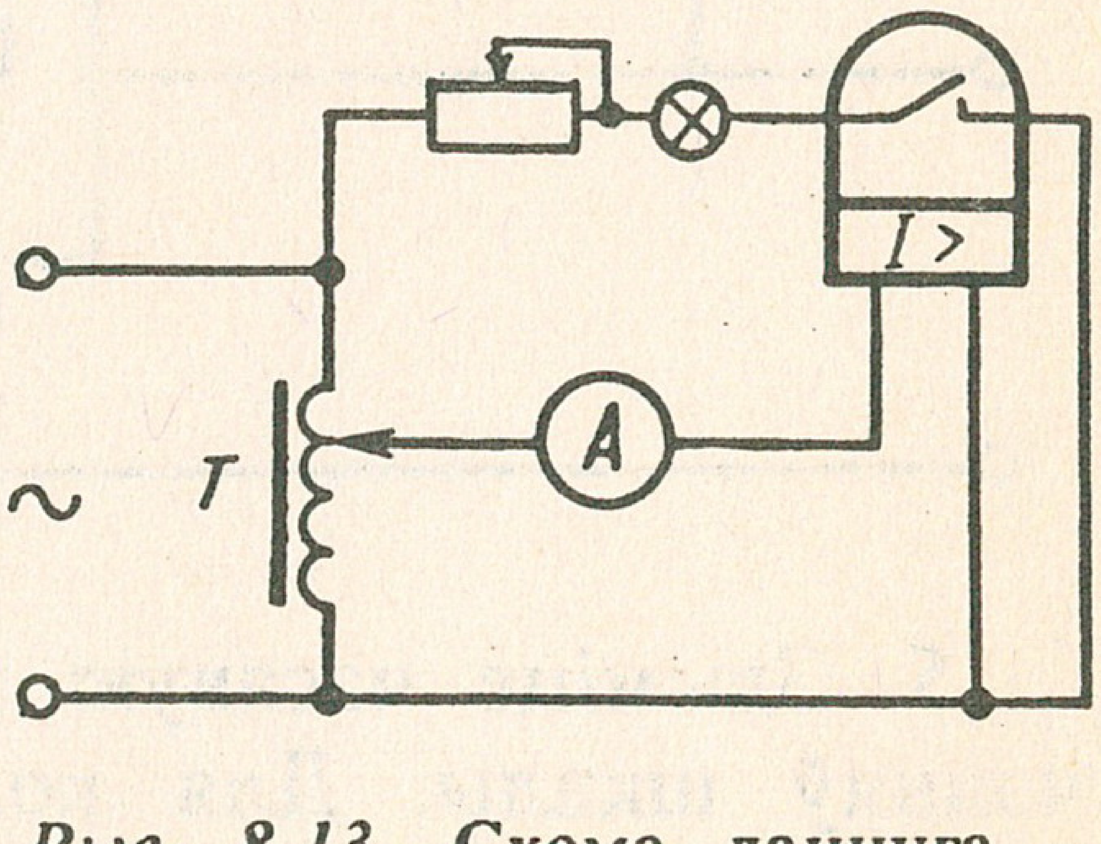


Рыс. 8.12. Схема ланцуга рэлейнай засцярогі з паўторным уключэннем

Пры кароткім замыканні або перагрузцы ланцуга, у які ўключана рэле максімальнага току, апошняе спрацоўвае і ўключае ланцуг абмоткі прамежкавага рэле. Прамежкавае рэле пры гэтым спрацоўвае і размыкае нармальна замкнутыя (*НЗ*) кантакты, адключае аварыйны участак ланцуга (размыкае ланцуг абмоткі і кантакты рэле максімальнага току), нармальна незамкнутыя (*НН*) кантакты замыкаюцца, блакіруюць рэле максімальнага току і забяспечваюць замкнутасць ланцуга абмоткі прамежкавага рэле. Адначасова праз выпрамнік уключаецца рэле часу.

Па сканчэнні часу вытрымкі рэле часу спрацоўвае і ўключае абмотку рэле паўторнага ўключэння. Рэле паўторнага ўключэння спрацоўвае і размыкае ланцуг абмоткі прамежкавага рэле, кантакты якога прыходзяць у першапачатковае становішча: *НЗ* — кантакты замыкаюцца, уключаюць аварыйны ўчастак ланцуга і абмотку рэле максімальнага току; *НН* — кантакты размыкаюцца і адключаюць рэле часу. Пры гэтым уся сістэма рэлейнай засцярогі прыходзіць у першапачатковы стан.

Выкананне работы



Рыс. 8.13. Схема ланцуга даследавання рэле максімальнага току

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме на рыс. 8.13. Кантрольным элементам замыкання і размыкання кантактаў рэле з'яўляецца лямпачка, а амперметр служыць для вымярэння току спрацоўвання рэле і току вяртання. Рэа-

стат служыць для абмежавання току ў ланцугу аператыўнага току.

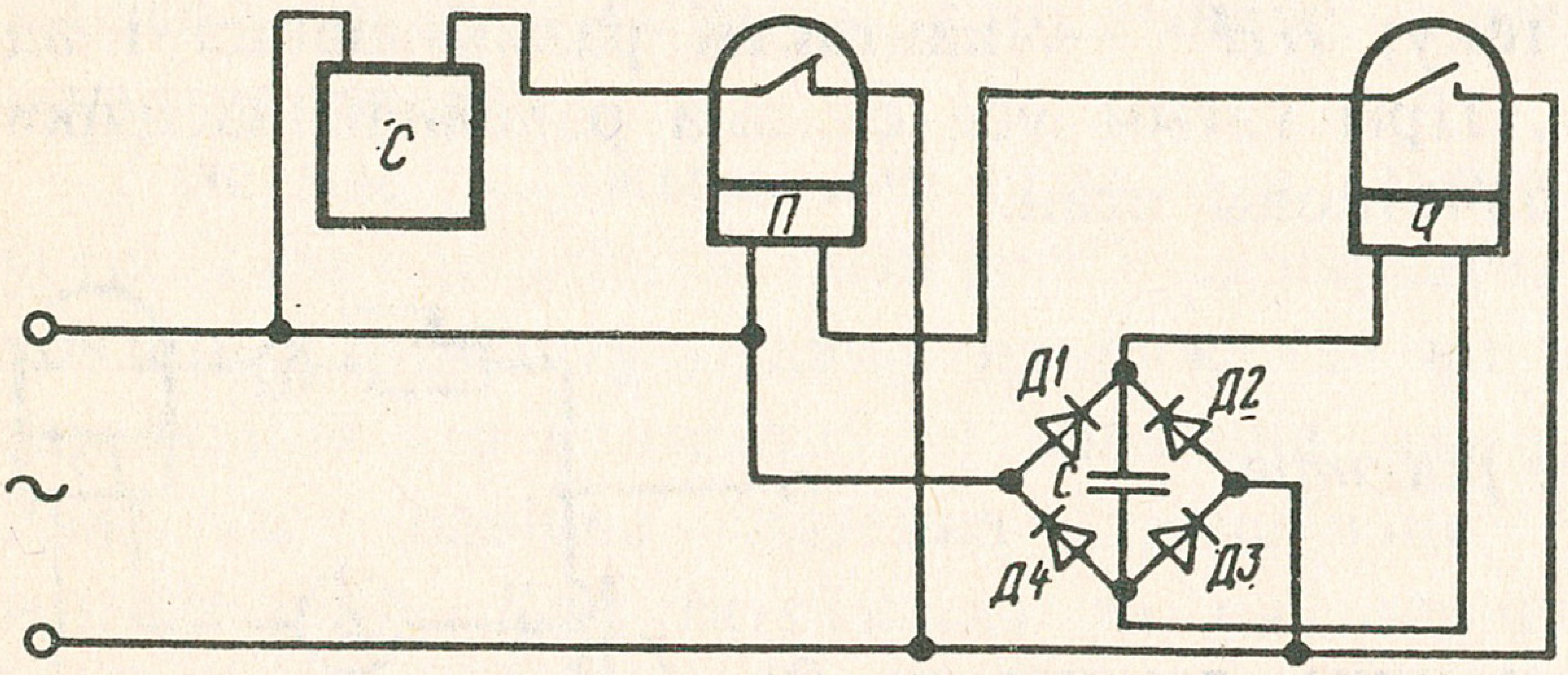
2. Вызначце ток спрацоўвання рэле і ток вяртання для пяці палажэнняў указальніка на шкале рэле і падлічыце для кожнага з іх каэфіцыент вяртання рэле. Устанавіце ўказальнік па шкале рэле, потым паваротам ручкі аўтатрансфарматара павялічвайце ток у абмотцы рэле. Ток спрацоўвання рэле ўстанаўліваецца па запальванні лямпачкі. Для вызначэння току вяртання неабходна спачатку павялічыць ток у рэле, а потым змяншаць яго да таго часу, пакуль лямпачка не патухне. Ток у гэты момант адпавядае току вяртання рэле. Для кожнага становішча ўказальніка на шкале зрабіце 2—3 вымярэнні і вызначце сярэдняе значэнне. Паказанні доследаў запішыце ў табл. 1.

Табліца 1

Нумар вымярэння	Устаноўка току на шкале	Ток спрацоўвання $I_с$	Ток вяртання $I_в$	Каэфіцыент вяртання k

3. Праверце рэле на вібрацыю і іскраванне шляхам плаўнага павелічэння току ў катушцы рэле ад намінальнага да магчымага значэння, але не больш трохкратнага. Калі кантакты рэле без іскравання і вібрацыі застаюцца закрытымі ў перыяд павелічэння току, то належыць лічыць, што яно спраўнае.

4. Збярыце электрычны ланцуг па схеме на рыс. 8.14. Рэле часу працуе на пастаянным току, таму ўключаецца ў сетку праз выпрамнік. У схеме рэле часу прамежкавае рэле і секундамер уключаюцца ў сетку паралельна. Секундамер служыць кантрольным прыборам.



Рыс. 8.14. Схема ланцуга даследавання рэле часу

5. Здыміце часавую характарыстыку рэле часу для 4—5 значэнняў шкалы. Для кожнага палажэння ўказальніка на шкале рабіце не менш трох вымярэнняў. Вымярэнні і вылічэнні запішыце ў табл. 2.

Т а б л і ц а 2

Нумар вымярэння	Час устаноўкі рэле	Час секундамера	Сярэдняе значэнне вымярэнняў часу	Хібнасць

6. Для вывучэння сістэмы рэлейнай засцярогі збярыце электрычны ланцуг па схеме на рыс. 8.12. Праверце рэлейную засцярогу для двух значэнняў току ў ланцугу нагрузкі. Нагрузкай ланцуга можа служыць нізкаомны паўзунковы рэастат $r_н$. Для кожнай нагрузкі ўстанавіце два значэнні часу вытрымкі рэле.

З а ў в а г а. Для павелічэння току ў ланцугу змяншаюць супраціўленне ланцуга шляхам плаўнага перамяшчэння паўзунка рэастата. Пасля таго як спрацуе рэле максімальнага току, змяншаюць нагрузку ланцуга — перамяшчаюць паўзунок рэастата ў зваротным кірунку. Дослед паўтараюць.

КАНТРОЛЬНЫЯ ПЫТАННІ

1. Якія рэле з'яўляюцца асноўнымі ў сістэме токавай засцярогі ланцуга? Дапаможнымі?
2. Як пабудавана і дзейнічае рэле максімальнага току ЭТ-521?
3. Для чаго абмотка ў рэле максімальнага току ЭТ-521 мае чатыры вывады?
4. Як устанаўліваецца намінальны ток спрацоўвання рэле?
5. Што называецца токам спрацоўвання рэле? Токам вяртання рэле?
6. Што называецца каэфіцыентам вяртання рэле і што ён характарызуе?
7. Як пабудавана і працуе рэле часу ЭВ-133?
8. Для чаго служыць рэле часу ў сістэме токавай засцярогі ланцуга?
9. Для чаго служыць рэле паўторнага ўключэння?
10. Укажыце паслядоўнасць уключэння ланцугоў у сістэме рэлейнай засцярогі з паўторным уключэннем?

9

БЫТАВАЯ ЭЛЕКТРАТЭХНІКА

9.1. Электрычныя крыніцы святла

Электрычныя крыніцы святла служаць для пераўтварэння электрычнай энергіі ў светлавую. Яны падзяляюцца на цеплавыя і крыніцы люмінесцэнтнага выпраменьвання.

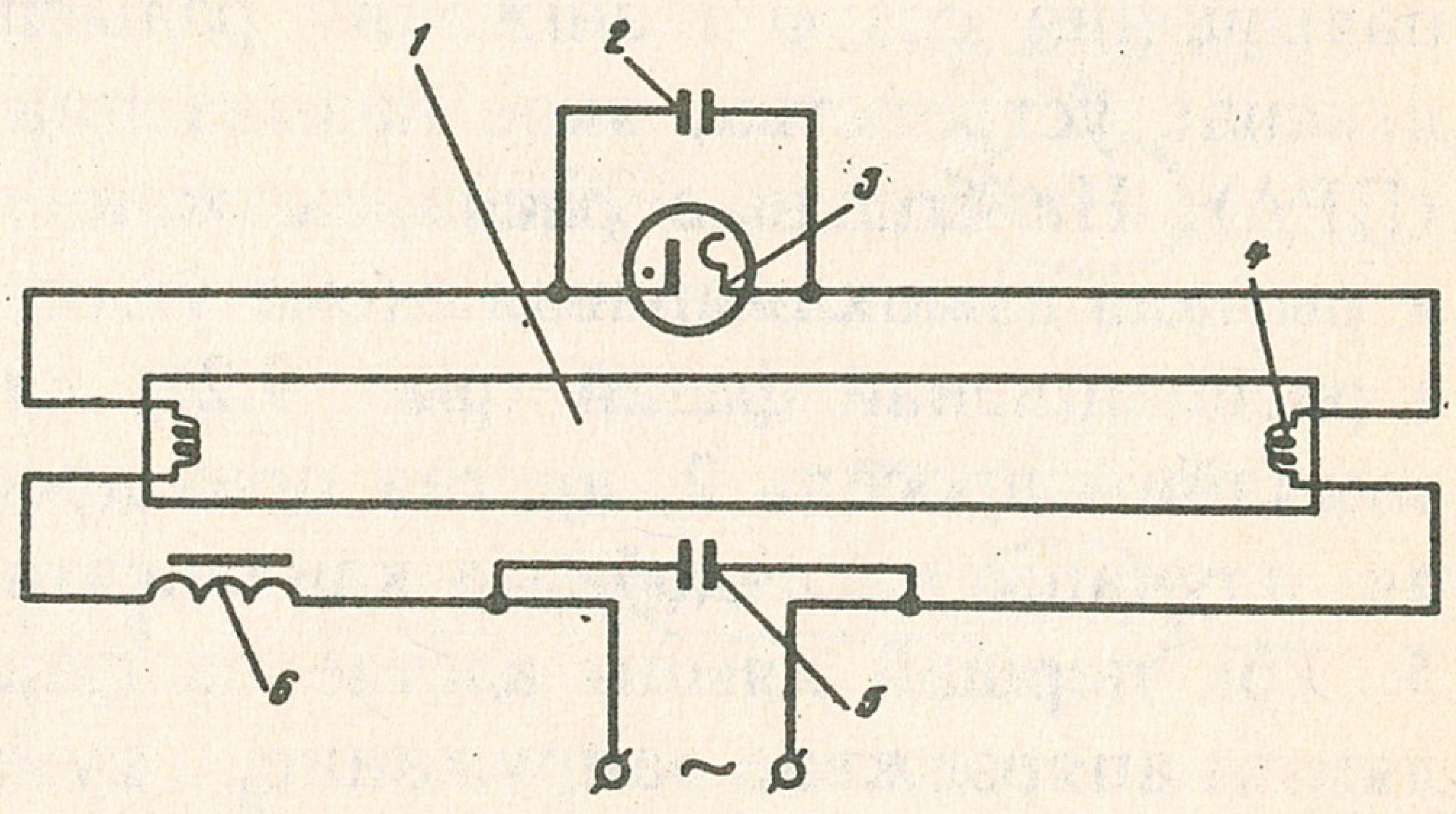
Цеплавымі крыніцамі святла з'яўляюцца лямпы напальвання. Першая лямпа напальвання была вынайдзена ў 1873 г. выдатным рускім электратэхнікам А.М. Ладыгіным. Напальным целам у ёй служыў вугальны стрыжань. Працуючы над удасканаленнем лямпы напальвання, А.М. Ладыгін прыйшоў да выраду аб неабходнасці прымяняць замест вугальных стрыжняў вальфрамавую ніць, чым паклаў пачатак вытворчасці сучасных лямпаў напальвання. У лямпах напальвання электрычны ток праходзіць па ніці напальвання (вальфрамавай спіралі) і напальвае яе да белага напалу. Пры гэтым толькі 2—4 % электрычнай энергіі пераўтвараецца ў светлавую, а астатняя частка расходуецца на цеплавое і нябачнае выпраменьванне. Каб вальфрамавая спіраль не згарэла, са шкляной колбы выпампоўваюць паветра. Такія лямпы называюцца *вакуумнымі*. Для змяншэння інтэнсіўнасці выпарвання вальфрамавай спіралі і павелічэння тэрміну службы лямпы са шкляной колбы выпампоўваюць паветра і напаўняюць яе інертнымі газамі: аргонам, крыптонам, ксенонам. Такія лямпы называюцца *газанапоўненымі* і знаходзяць шырокае выкарыстанне на практыцы.

Тэрмін службы лямпы напальвання пры намінальным напружанні складае 1000 гадз. Па ДАСТ 2239-70 лямпы напальвання выпрабляюцца на напружанне 220 і 127 В магутнасцю ад 15 да 1500 Вт, а для мясцовага асвятлення рабочых месц — на напружанне 12 і 36 В магутнасцю да 100 Вт з люстраным або дыфузным адлюстравальным слоем унутры колбы.

Лямпы напальвання характарызуюцца наступнымі велічынямі: напружаннем, магутнасцю, светлавым патокам і светлавой аддачай.

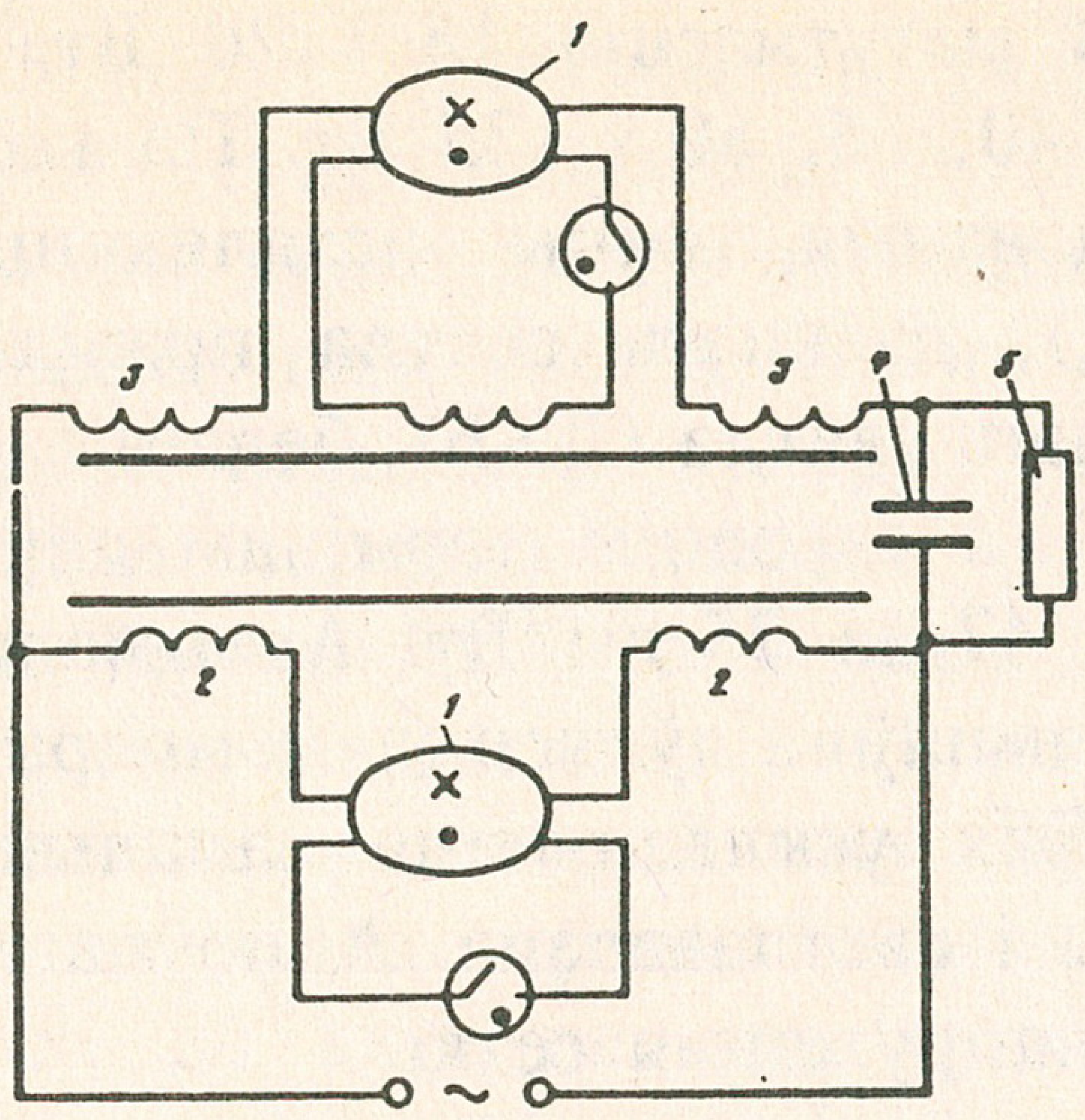
Светлавая аддача вызначаецца стасункам светлавога патоку да магутнасці лямпы. Акрамя лямпаў напальвання агульнага прызначэння, прамысловасцю выпускаюцца галоідныя лямпы на напружанне 220 В магутнасцю 1000, 1500 і 2000 Вт з тэрмінам службы 2000 гадз. У гэтых лямпах, акрамя інертнага газу, у колбу ўводзіцца нязначная колькасць чыстага ёду. Пры рабоце лямпы пары ёду ўступаюць у рэакцыю з часціцамі выпаранага вальфраму і ўтвараюць газападобнае злучэнне — ёдіт вальфраму, які асаджваецца на сценках колбы, а трапіўшы ў зону высокіх тэмператур паблізу ніці напалу, распадаецца зноў на вальфрам і ёд. Вальфрам асаджваецца на ніці напалу, а часціцы ёду вяртаюцца да колбы і зноў прымаюць удзел у галоідным цыкле. Для працякання галоіднага цыкла неабходна, каб сценка колбы мела тэмпературу 500—700 °С, а ніць напалу — больш як 2500 °С. Колба галоіднай лямпы вырабляецца з кварцавага шкла ў выглядзе трубкі дыяметрам 10—12 мм, а ніць напалу размяшчаецца па восі трубчатай колбы. Галоідныя лямпы маюць перавагу перад лямпамі напальвання. Светлавы паток у іх к канцу службы змяншаецца на 3—4 % супраць 15—20 % у лямпах напальвання агульнага прызначэння. Тэрмін іх службы ўдвая большы, спектральны састаў светлавога патоку блізкі да натуральнага, светлавая аддача на 15—20 % вышэйшая і памеры значна меншыя за памеры лямпаў напальвання. Галоідныя лямпы вызначаюцца высокай механічнай трываласцю, нагрэвастойкасцю і не разбураюцца пры рабоце ў асяроддзі з рэзка зменлівай тэмпературай. Шырокае прымяненне ў асвятляльных устаноўках атрымалі больш эканамічныя крыніцы святла — трубчатыя люмінесцэнтныя лямпы нізкага ціску і дугавыя ртутныя люмінесцэнтныя лямпы высокага ціску з выпраўленай колернасцю (ДРЛ). Кіраўніцтва па распрацоўцы люмінесцэнтных лямпаў ажыццяўлялася рускім фізікам С.І. Вавілавым. Аптычныя работы С.І. Вавілава ў вобласці тэорыі святла і люмінесцэнцыі аб'яднаны ім у манаграфіі «Мікраструктура святла», якая ўдастоена Дзяржаўнай прэміі першай ступені.

Люмінесцэнтныя лямпы нізкага ціску (рыс. 9.1) уяўляюць сабой запаяную з абодвух канцоў шкляную трубку *1*. Даўжыня і дыяметр трубкі вызначаюцца магутнасцю лямпы і напружаннем, на

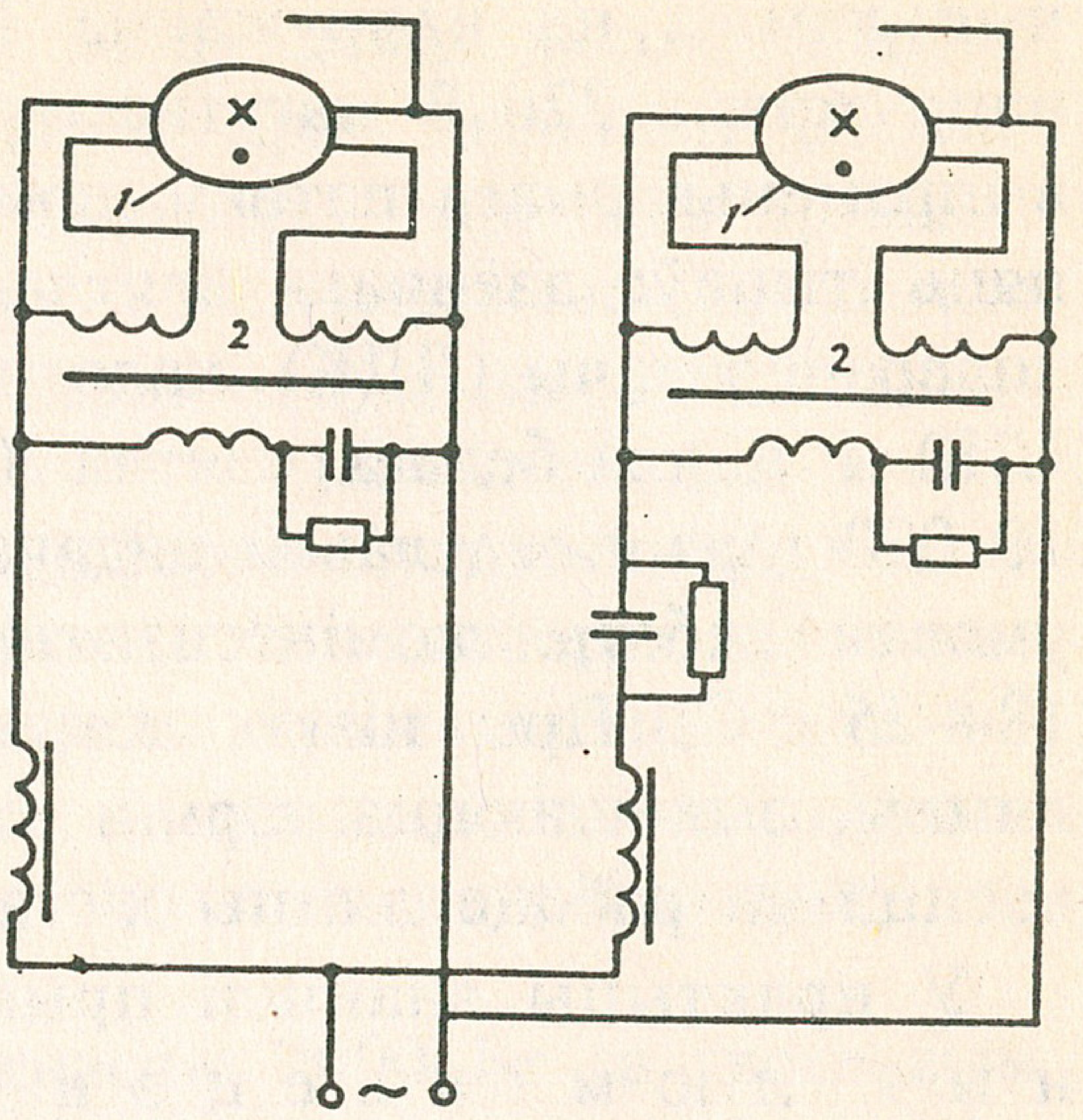


Рыс. 9.1. Схема ўключэння люмінесцэнтных лямпаў у ланцуг

якое яна разлічана. Унутраная паверхня трубкі пакрыта тонкім слоем люмінафора (вальфраматам магнію, цынкаберыліевым сілікатам). У тарцы трубкі ўпаяны вальфрамавыя электроды *4*, якія пакрыты актыўным слоем (аксіды шчолачных металаў — стронцыю, барыю і кальцыю) і далучаны да штыркоў цокаля лямпы. Пасля выпампоўвання паветра трубку напаўняюць нязначнай колькасцю чыстага аргону і ўводзяць кропельку ртуці. Ціск аргону і пароў ртуці ў трубцы пры тэмпературы 40 °С роўны 13,3 кПа. Люмінесцэнтная лямпа забяспечваецца стартэрам (запальнікам) *3* і дроселем *6*. Стартэр уяўляе сабой неонавую лямпачку з двума электродамі, адзін з якіх з'яўляецца біметалічнай пласцінкай. Пры ўключэнні лямпы ў сетку паміж электродамі стартэра праходзіць тлеючы разрад. Пры гэтым біметалічная пласцінка награваецца, згінаецца і замыкаецца з другім кантактам. Пасля гэтага супраціўленне стартэра становіцца малым і ток награвае электроды *4* лямпы, а біметалічная пласцінка ахалоджваецца і размыкае ланцуг. Пры наяўнасці дроселя ў момант размыкання ланцуга паміж электродамі лямпы ўзнікае ЭРС самаіндукцыі, якая стварае разрад у аргоне і парах ртуці. Дросель, уключаны паслядоўна ў ланцуг, служыць для стварэння ЭРС самаіндукцыі, а таксама для згладжвання пульсацый разраду і абмежавання току. Аблучэнне люмінесцэнтнага рэчыва на сценках трубкі фіялетавымі і ультрафіялетавымі праменямі пры разрадзе ў трубцы выклікае яго свячэнне. Падбор адпаведнага саставу люмінесцэнтнага рэчыва дае магчымасць атрымаць свячэнне, блізкае да дзённага святла. Для устаранення перашкод радыёпрыёму паралельна стартэру ўключаецца кандэнсатар *2* ёмістасцю 0,006 мкФ. Кандэнсатар *5* ёмістасцю 4—8 мкФ уключаны ў ланцуг дроселя паралельна крыніцы току, павышае ККД лямпы да 95 %. Сярэдні тэрмін службы люмінесцэнтнай лямпы складае 3000 гадз. Недахопамі стартэрнага ўключэння люмінесцэнтнай лямпы з'яўляюцца яе нізкі каэфіцыент магутнасці ($\cos \varphi = 0{,}5$), а таксама перашкоды радыёпрыёму. Для павышэння $\cos \varphi$ і зніжэння радыёперашкод прымяняецца комплекснае ўстройства, якое называецца *пускарэгулюючым апаратам* (ПРА). Найбольшае распаўсюджанне ў асвятляльных устройствах атрымала дзвюхлямпавая схема ўключэння люмінесцэнтных лямпаў з расшчэпленай фазай (рыс. 9.2). Адна лямпа *1* уключаецца праз звычайны дросель *2*, другая праз дросель *3* меншай індуктыўнасці, які злучаны паслядоўна з кандэнсатарам *4* і разрадным рэзістарам *5*. Ток першай лямпы адстае па фазе ад напружання, ток другой лямпы апярэджвае напружанне, а сумарны светлавы паток абедзвюх лямпаў становіцца амаль пастаянным, хістанне сумарнага светлавога патоку складае 10—15 %. Каэфіцыент магутнасці павышаецца да 92 %.



Рыс. 9.2. Уключэнне двух люмінесцэнтных лямпаў у ланцуг па схеме з расшчэпленай фазай

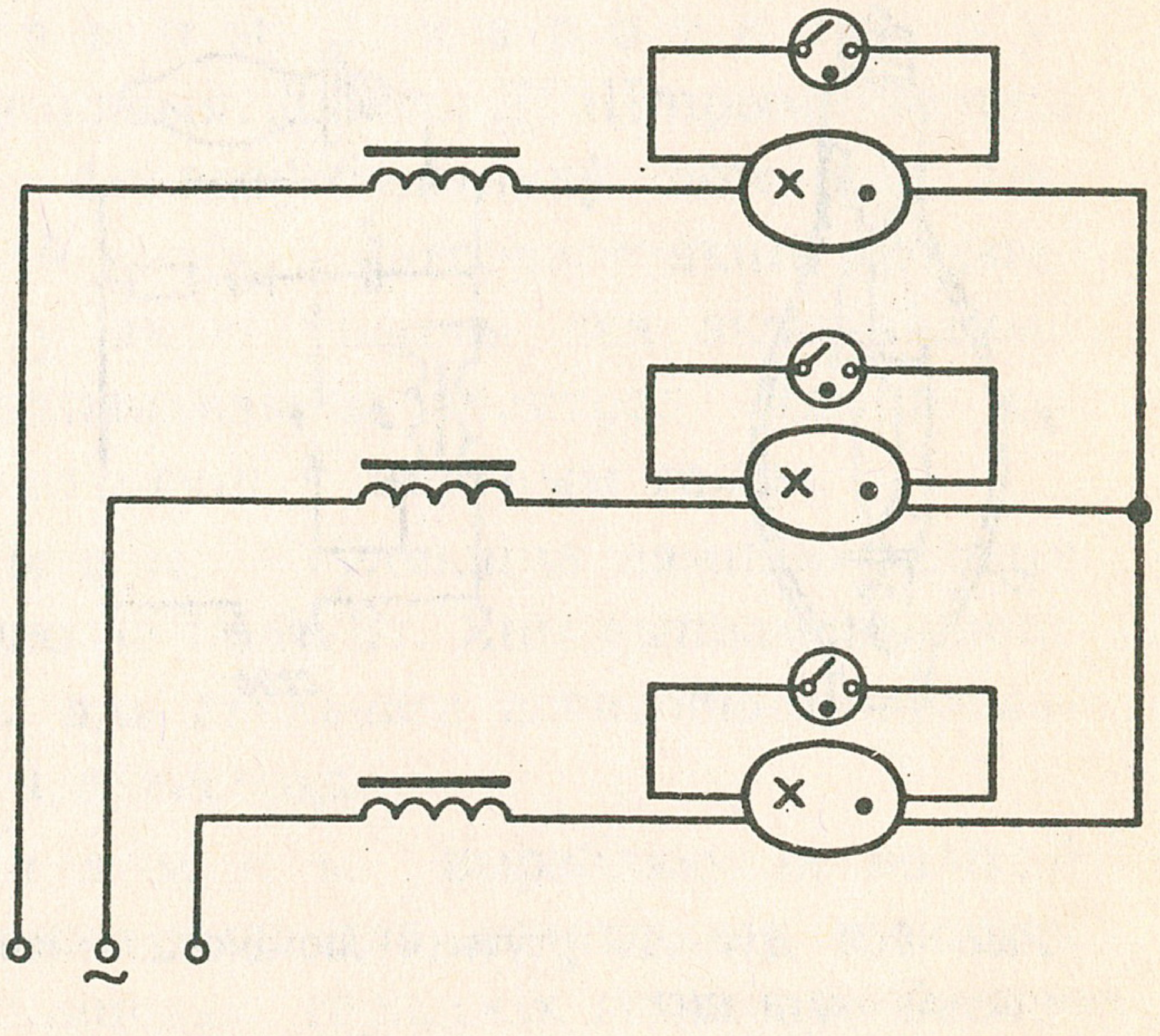


Рыс. 9.3. Бесстартэрная схема ўключэння двух люмінесцэнтных лямпаў у ланцуг

Бесстартэрныя ПРА выпускаюцца з індуктыўнымі і ёмістаснымі мастамі для люмінесцэнтных лямпаў *1* магутнасцю 40, 65 і 80 Вт. Падагрэў электродаў лямпаў адбываецца з дапамогай награвальных трансфарматараў *2* (рыс. 9.3). У схему ўключаны парамі індуктыўны і ёмістасны баласты, пры гэтым сумарны светлавы паток лямпы мае нязначную пульсацыю, а каэфіцыент магутнасці павышаецца да 92 %. Пры гарэнні лямпы праз яе электроды праходзіць ток нагрэву, які выклікае дадатковыя страты магутнасці. Для зніжэння напружання запальвання лямпы да аднаго яе электрода падключаюць металічную палоску.

Пры ўключэнні паралельна трох люмінесцэнтных лямпаў у трохфазную сетку (рыс. 9.4) хістанне светлавога патоку складае 2—3 %, што забяспечвае раўнамернасць светлавога патоку.

Аднак для асвятлення жылых памяшканняў такое ўключэнне не выкарыстоўваецца, бо ў іх прымяняецца аднафазная сетка.

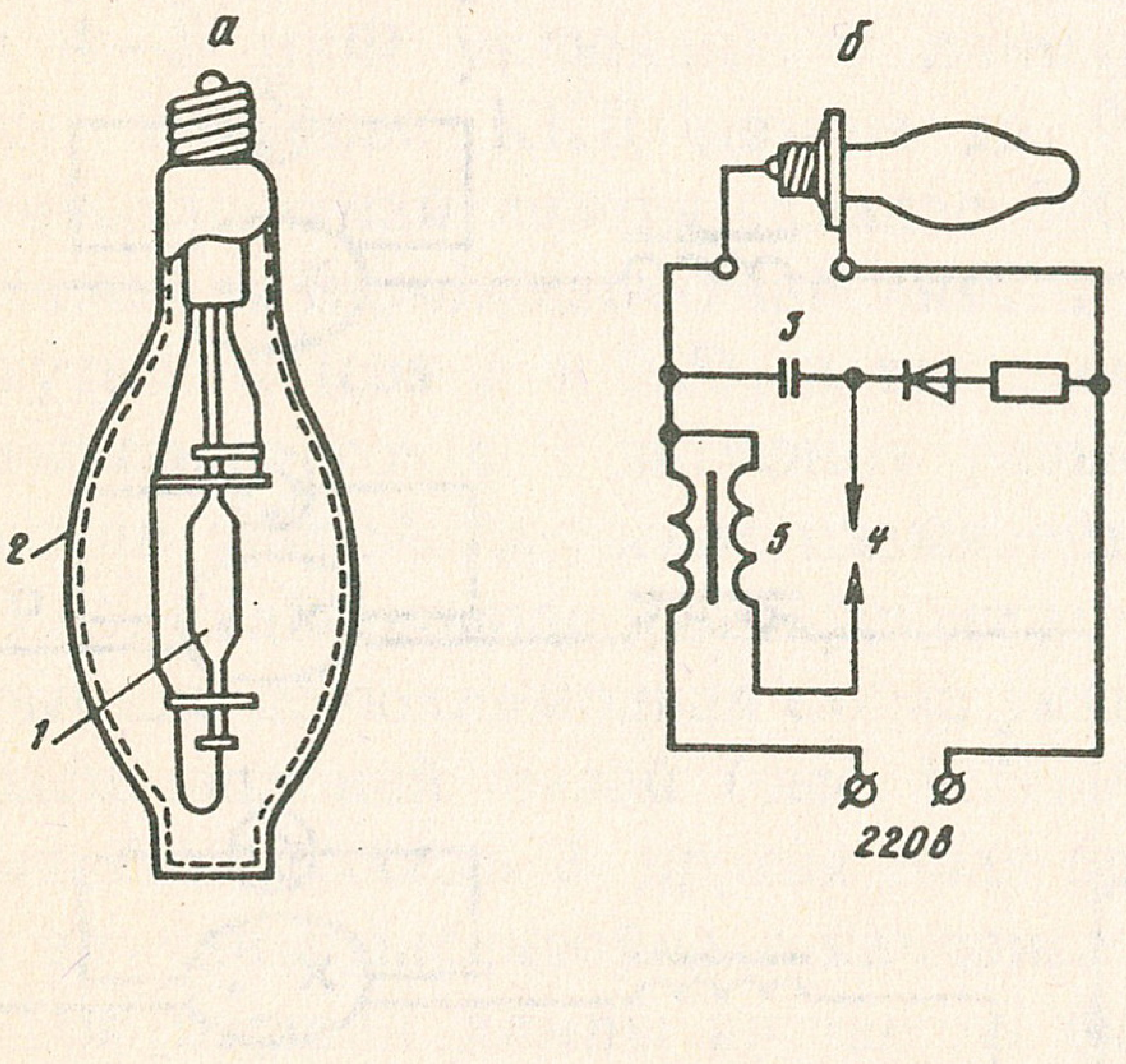


Рыс. 9.4. Схема ўключэння люмінесцэнтных лямпаў у трохфазны ланцуг

Па ДАСТ 6825—70 прамысловасцю выпускаюцца люмінесцэнтныя лямпы на напружанне 127 В магутнасцю 15 і 20 Вт і на напружанне 220 В магутнасцю 30, 40, 65, 80 і 125 Вт. Па колеру выпраменьваемага патоку люмінесцэнтныя лямпы падзяляюцца на пяць тыпаў: дзённага святла (ЛД), дзённага святла правільнай колераперадачы (ЛДК), халодна-белага святла (ЛХБ), белага святла (ЛБ) і цёпла-белага святла (ЛЦБ) з сярэднім тэрмінам службы 10 000 гадз і светлавой аддачай ад 47 да 75 лм/Вт. Аптымальнай умовай работы люмінесцэнтных лямпаў з'яўляецца тэмпература 18—25 °С. Пры нізкіх тэмпературах ускладняецца запальванне лямпы, змяншаюцца тэрмін службы і светлааддача. Адмоўна адбіваецца на рабоце лямпы хістанне напружання сеткі.

У практыцы знайшлі прымяненне дугавыя ртутныя люмінесцэнтныя лямпы высокага ціску з выпраўленай колернасцю (ДЛР). Гэтыя лямпы выпускаюцца прамысловасцю адзінай магутнасцю 80, 125, 250, 400, 700 і 1000 Вт на напружанне 220 В са светлавой аддачай 40—55 лм/Вт і сярэднім тэрмінам службы 10 000 гадз.

ДРЛ (рыс. 9.5, *а*) складаецца з прамой кварцавай трубкі (гарэлкі) *1*, напоўненай дазіраванай колькасцю ртуці і аргону пад вялікім ціскам (0,5—5 МПа). Кварцавая трубка размяшчаецца ўнутры балона *2* з тугаплаўкага шкла, на ўнутраную паверхню якога нанесены слой люмінафора. Для павышэння ўстойлівасці люмінафора прастора ў балоне запаўняецца інертным газам. Лямпа ДРЛ уключаецца ў сетку пераменнага току з дапамогай пускарэгулюючага апарата (рыс. 9.5, *б*). Запальванне лямпы ажыццяўляецца наступным чынам: пры ўключэнні лямпы ў сетку зараджаецца кандэнсатар *3*. Калі напружанне на кандэнсатары дасягае пэўнага значэння, ён разраджаецца праз разраднік *4* на дадатковую абмотку трансфарматара *5*. Пры гэтым у асноўнай абмотцы дроселя ўзнікае ЭРС індукцыі — імпульс высокага напружання, які і запальвае лямпу. Працэс



Рыс. 9.5. Дугавая ртутная люмінесцэнтная лямпа высокага ціску:

а — устройства; *б* — уключэнне ў ланцуг з дапамогай пускарэгулявальнага апарата (ПРА)

разгарання лямпы да намінальнага свячэння працягваецца да 10—15 мінут. Электрычны разрад у парах ртуці высокага ціску (гарэлкі) суправаджаецца інтэнсіўным выпраменьваннем святла, у спектры якога амаль адсутнічаюць аранжава-чырвоныя прамяні. Люмінафор падбіраецца такога саставу, каб выпраменьваць святло аранжава-чырвонага колеру, якое, перамяшаўшыся з асноўным светлавым патокам гарэлкі, робіць лямпу прыгоднай для асвятлення. Лямпы ДРЛ устойлівыя да атмасферных уздзеянняў, маюць вялікі светлавы паток, які не залежыць ад тэмпературы навакольнага асяроддзя. Лямпы ДРЛ шырока прымяняюцца для асвятлення вуліц, аўтамабільных дарог, у цэхах і іншых памяшканнях, да якіх не прад'яўляецца асаблівых патрабаванняў па колераперадачы.

Цяпер распрацаваны лямпы магутнасцю 2000 Вт са светлавым патокам 120 000 лм і тэрмінам службы 4000 гадз для ўключэння ў сетку пераменнага току 380 В.

Агульным недахопам люмінесцэнтных лямпаў і лямпаў ДРЛ з'яўляецца пульсацыя светлавога патоку з частатой, роўнай падвоенай частаце току сеткі. Пульсацыя светлавога патоку з'яўляецца прычынай страбаскапічнага эфекту, які звязаны са скажэннем успрымання прадметаў, якія рухаюцца. Дэталі, якія верцяцца, асветленыя люмінесцэнтнымі лямпамі або лямпамі ДРЛ, могуць здацца нерухомымі або павольна верцяцца ў процілеглы бок. Гэта непажаданая з'ява выпраўляецца ўключэннем лямпаў у розныя фазы трохфазнай сеткі або з дапамогай спецыяльных схем уключэння.

У рознага роду асвятляльных установках прымяняюцца шаравыя ртутныя лямпы з кароткай дугой (ДРШ), натрыевыя і ксенонавыя. Лямпы ДРШ прымяняюцца ў пражэктарах для асвятлення фасадаў будынкаў, помнікаў, манументаў. Яны ўяўляюць сабой колбу з нагрэвастойкага кварцавага шкла шаравой формы, у якую ўпаяны два актываваныя вальфрамавыя электроды і запальваючы электрод. Лямпа напоўнена дазіраванай колькасцю ртуці і інертным газам.

Натрыевыя лямпы з'яўляюцца лямпамі нізкага ціску і вырабляюцца магутнасцю 85 і 140 Вт. Яны выпраменьваюць жоўтае святло і не прыгодныя для агульнага асвятлення, прымяняюцца для асвятлення вуліц і аўтастрад.

Ксенонавыя лямпы вырабляюцца вялікай адзінкавай магутнасці і прымяняюцца для асвятлення глыбокіх кар'ераў, вялікіх будаўнічых пляцовак, гарадскіх плошчаў. Спектральны састаў выпраменьваемага святла ксенонавых лямпаў найбольш блізкі да сонечнага. Запальванне ажыццяўляецца з дапа-

могай запальнага ўстройства, якое стварае высакавольтны імпульс напружання на электродах лямпы.

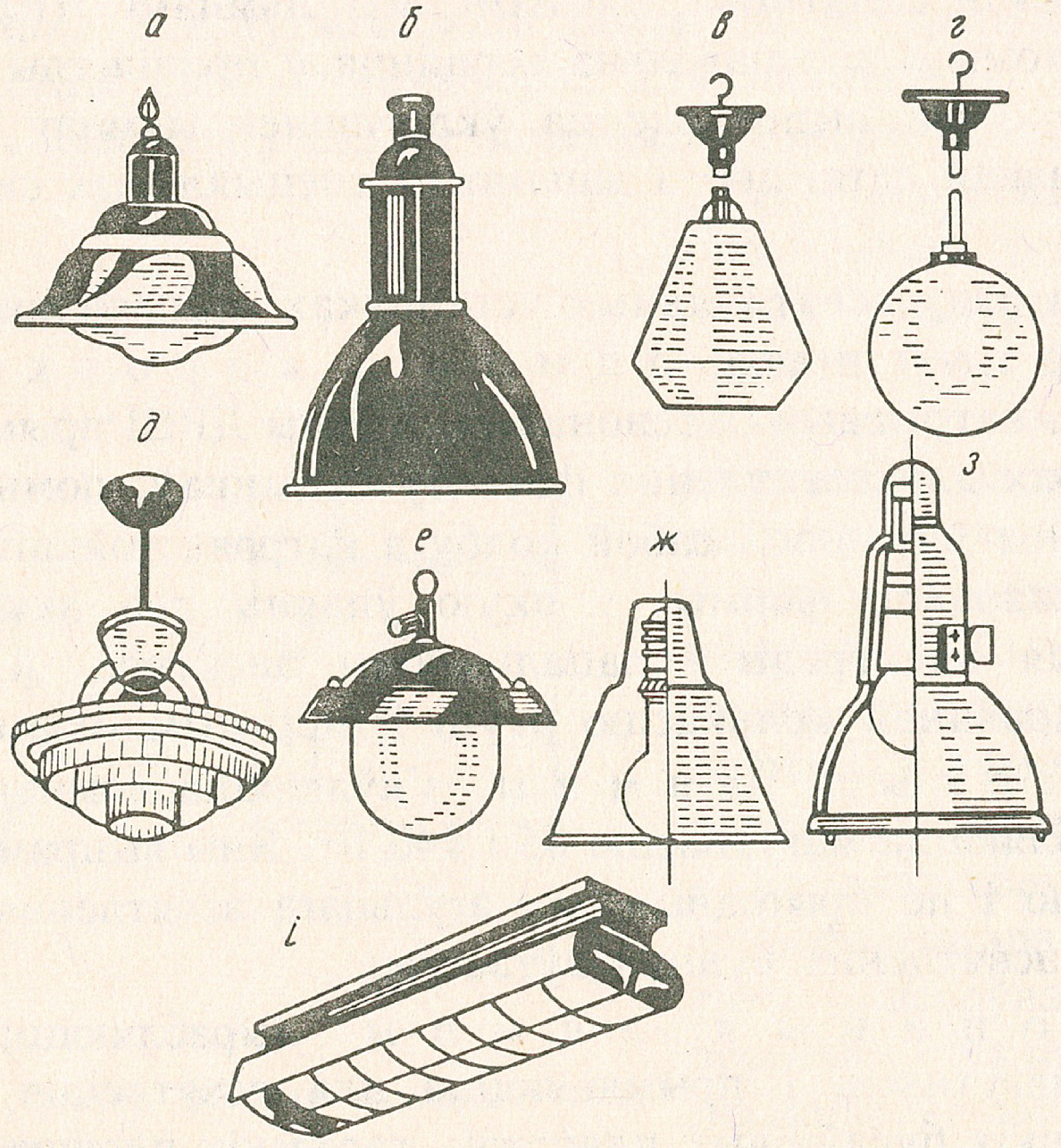
Для кіравання і раўнамернага рассеяння светлавога патоку лямпаў, аховы вачэй ад празмернай яркасці святла, аховы лямпы ад механічных пашкоджанняў і пылу, мацавання крыніцы святла прымяняюцца свяцільнікі. Па спосабу ўстаноўкі прынята адрозніваць падвясныя столевыя (плафоны), насценныя (бра) і падлогавыя (таршэры) свяцільнікі.

З лямпамі напальвання прымяняюцца наступныя свяцільнікі.

Свяцільнік «Універсаль» (рыс. 9.6, *а*) складаецца з металічнага каўпака, які пакрыты зверху цёмнай, а ўнутры белай эмаллю. Ён адлюстроўвае да 90 % светлавога патоку ў ніжнюю паўсферу. У ім выкарыстоўваюцца лямпы магутнасцю да 500 Вт, якія прымяняюцца ў вытворчых памяшканнях з вышынёй падвесу 4—6 м.

Глыбокавыпраменьвальнік эмаліраваны (рыс. 9.6, *б*) служыць для асвятлення вытворчых памяшканняў з вышынёй падвесу да 10 м. У ім выкарыстоўваюцца лямпы магутнасцю 200, 500 і 1000 Вт.

Свяцільнік «Люцэта» (рыс. 9.6, *в*) вырабляецца з матавага шкла ў выглядзе каўпака, адкрытага знізу. Ён различаны



Рыс. 9.6. Свяцільнікі

на лямпы магутнасцю да 200 Вт. Свяцільнік прымяняецца для асвятлення адміністрацыйных, гандлёвых, лячэбных, праектных, навучальных і вытворчых памяшканняў з малым утрыманнем пылу пры вышыні падвесу 3—5 м.

Шар з малочнага шкла (рыс. 9.6, *г*) вырабляецца розных дыяметраў і служыць для раўнамернага рассеяння светлавога патоку. Прымяняецца з лямпамі магутнасцю да 1000 Вт для асвятлення жылых дамоў і службовых памяшканняў са светлымі столлю і сценамі пры вышыні падвесу да 4 м.

Кальцавы свяцільнік (рыс. 9.6, *д*) вырабляецца з металічнымі і іншымі кольцамі з закрытым або адкрытым малым кальцом. Прымяняюцца з лямпамі магутнасцю 150—200 Вт для асвятлення вучэбных памяшканняў і дзіцячых устаноў.

Водапыланепранікальны свяцільнік (рыс. 9.6, *е*) прымяняецца для асвятлення асабліва сырых і пыльных памяшканняў з едкімі парамі і газамі.

Свяцільнік «Альфа» (рыс. 9.6, *ж*) уяўляе сабой металічны каўпак, паверхня якога зверху пакрыта цёмнай, а ўнутры белай эмаллю. Прымяняецца з лямпамі да 75 Вт для асвятлення рабочых месц і ўстанаўліваецца на адлегласці 0,3—0,5 м ад асвятляльнай паверхні.

Свяцільнік «Бэта» з люстраным адлюстраваннем (рыс. 9.6, *з*) з'яўляецца найбольш дасканалым свяцільнікам мясцовага асвятлення. Ён служыць для стварэння ўзмоцненай асветленасці рабочага месца.

З люмінесцэнтнымі лямпамі прымяняюцца свяцільнікі іншых канструкцый (рыс. 9.6, *і*), асноўнымі канструктыўнымі элементамі якіх з'яўляюцца: металічны корпус з вузламі ўстаноўкі; панель металічная, на якой знаходзіцца ПРА, лямпатрымальнік і стартэратрымальнік, адлюстравальнік, рассеяннік або экранавальная рашотка.

Падвясныя і столевыя свяцільнікі серыі ЛД з'яўляюцца свяцільнікамі прамога святла, разлічаны на работу з дзвюма люмінесцэнтнымі лямпамі магутнасцю 40 і 80 Вт. Яны вырабляюцца з суцэльнымі адлюстравальнікамі без рашоткі (ЛД); з рашоткай (ЛДР); з двума радамі дзірак у верхняй частцы без рашоткі (ЛДО); з двума радамі дзірак у верхняй частцы з рашоткай (ЛДОР).

Убудаваныя ў перакрыццё свяцільнікі серыі УВА прызначаны для агульнага асвятлення прамысловых і грамадскіх будынкаў.

Свяцільнікі столевыя універсальныя серыі УСС прызначаны для агульнага

асвятлення памяшканняў жылых і грамадскіх будынкаў. У гэту серыю ўваходзяць свяцільнікі з дзвюма, чатырма і шасцю люмінесцэнтнымі лямпамі магутнасцю 20 і 40 Вт. Яны маюць металічную аснову, якая складаецца з адной, дзвюх і трох панеляў, рассеянніка з арганічнага шкла або экранавальнай рашоткі з пластмасы.

Падвясныя і столевыя свяцільнікі серыі ПВЛМ прымяняюцца для агульнага асвятлення сырых і пыльных памяшканняў.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. На якія два тыпы падзяляюцца электрычныя крыніцы святла?
2. Якія асаблівасці галоідных лямпаў?
3. Якія ўстройства і прынцыпы дзеяння люмінесцэнтных лямпаў нізкага ціску?
4. Якія асаблівасці двухлямпавай схемы ўключэння люмінесцэнтных лямпаў з расшчэпленай фазай?
5. Якія ўстройства і прынцыпы дзеяння бесстартэрных ПРА люмінесцэнтных лямпаў?
6. У чым асаблівасці паралельнага ўключэння трох люмінесцэнтных лямпаў?
7. Якія ўстройства і прынцып работы дугавых ртутных люмінесцэнтных лямпаў высокага ціску з папраўленай колернасцю (ДРЛ)?
8. Якія агульныя недахопы люмінесцэнтных лямпаў?
9. Якое ўстройства і дзе прымяняюцца шаравыя ртутныя лямпы з кароткай дугой (ДРШ), натрыевыя і ксенонавыя лямпы?
10. Для чаго прымяняюцца свяцільнікі? Назавіце асноўныя віды свяцільнікаў.

9.2. Награвальныя прыборы

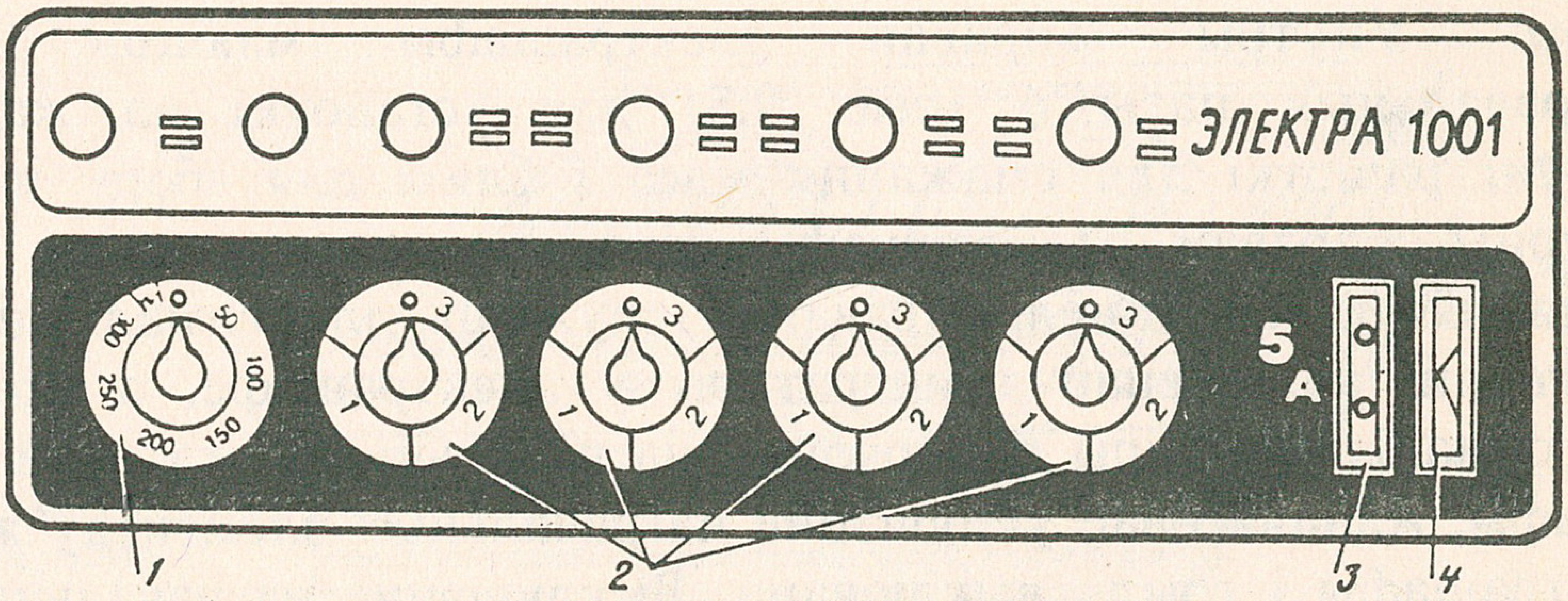
Да награвальных прыбораў належаць электрапрыборы для прыгатавання стравы, нагрэву вадкасці, ацяплення і інш. Прамысловасцю выпускаюцца награвальныя электрапрыборы без рэгулявання, з рэгуляваннем тэмпературы нагрэву, магутнасці і прыборы з праграміраваным кіраваннем. Для аўтаматычнага рэгулявання тэмпературы нагрэву прымяняюцца тэрмарэгулятары, якія аўтаматычна падтрымліваюць зададзеную тэмпературу прыбора, напрыклад, у электрапрэсах, электрахаладзільніках і інш.

Электрапрыборамі для прыгатавання стравы з'яўляюцца кухонныя стацыянарныя электрапліты, аднаканфорачныя і двухкан-

форачныя пераносныя электраплíткі, электракаструлі, электрапечы, электракававаркі, электрагрылі, электрашашлычніцы, электрашафы і інш.

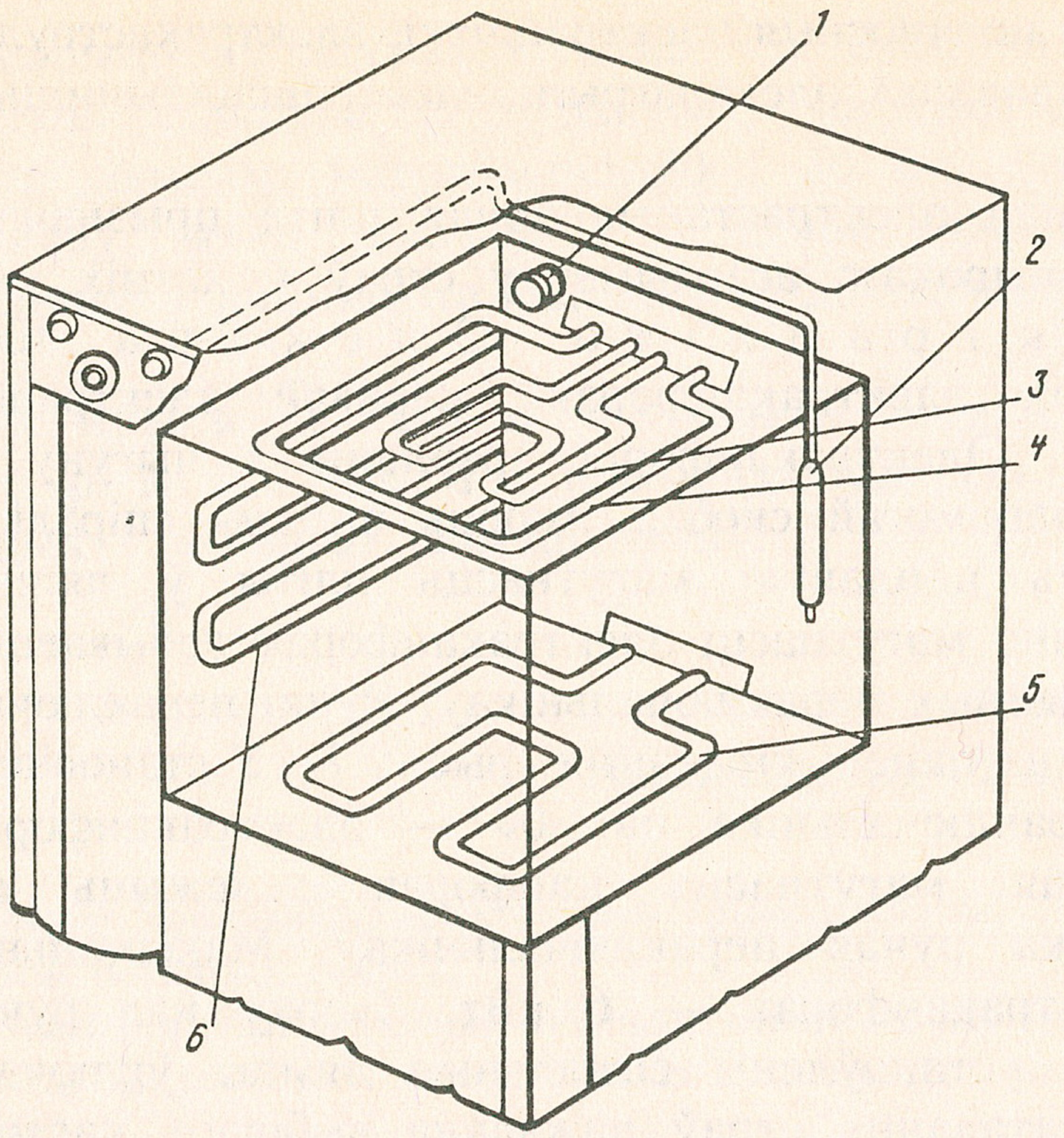
Кухонная электрастацыянарная пліта прызначана для прыгатавання шырокага асартыменту страў у хатніх умовах.

Электрапліта «Электра 1001» складаецца з чатырох электраканфорак, жаравай электрашафы і панелі кіравання. Электраканфоркі зроблены з чыгуну, мацуюцца да стала з дапамогай скобак, маюць па тры спіралі, што дазваляе рэгуляваць цеплавую магутнасць пліты ў вялікім дыяпазоне. Рэгуляванне магутнасці электраканфорак адбываецца з дапамогай сяміпазіцыйных пераключальнікаў. Ручкі пераключальнікаў *2* размешчаны на панелі кіравання (рыс. 9.7). У становішчы ўказальніка ручкі пераключальніка на «0» — электраканфорка выключана. Неабходная магутнасць канфорак залежыць ад становішча ўказальніка ручак пераключальнікаў. Максімальная магутнасць усіх электраканфорак — 6 кВт. Зверху над ручкамі пераключальнікаў устаноўлены сігнальныя лямпы ўключэння канфорак. Для прыгатавання страў пажадана выбіраць каструлю з плоскім дном, што забяспечыць лепшы кантакт з канфоркай і больш поўнае выкарыстанне яе цеплавой энергіі. Трэба не дапускаць, каб вадкасць трапіла на гарачую канфорку, бо гэта прыводзіць да з'яўлення шчылін і сапсавання канфорак.



Рыс. 9.7. Панель кіравання электрапліты "Электра 1001"

Жаравая электрашафа (рыс. 9.8) мае верхнія *4* і ніжнія *5* трубчатыя электранагравальнікі (ТЭНы), высокатэмпературны награвальнік (грыль) *3*, датчык тэрмарэгулятара *2* і лямпу асвятлення жаравай электрашафы *1*. Уключэнне награвальных элементаў жаравай электрашафы і грыля адбываецца ручкай трохпазіцыйнага пераключальніка *1*, які ўстаноўлены на панелі кіравання (гл. рыс. 9.7). Пры ўстаноўцы ручкі пераклю-



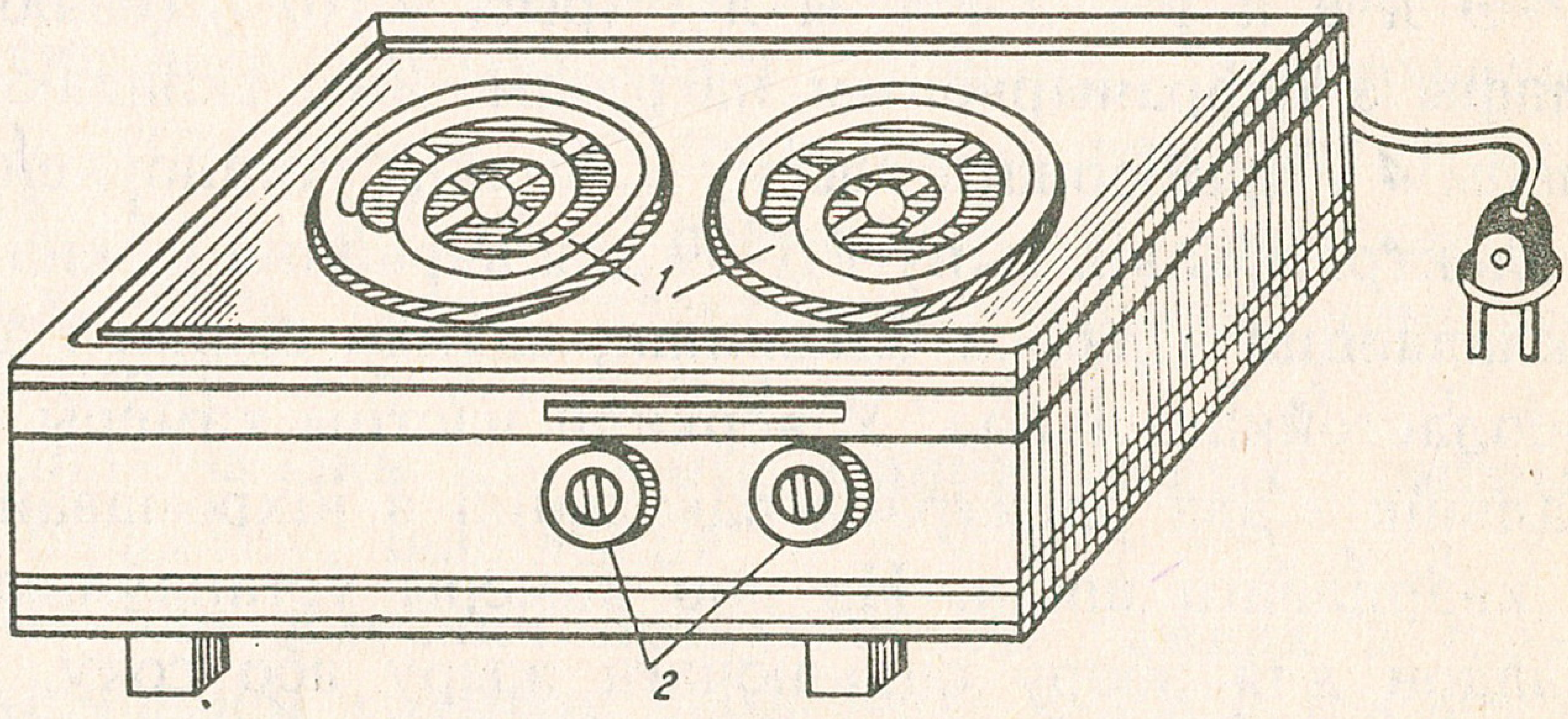
Рыс. 9.8. Схема жаравай шафы

чальніка на «0» жаравая шафа адключана. Пры ўстаноўцы ўказальніка ручкі пераключальніка на сімвал «грыль» — уключаны грыль, на лічбу-ўказальнік тэмпературы нагрэву жаравай электрашафы — уключаны награвальныя элементы жаравай электрашафы. Унутры жаравай электрашафы маюцца чатыры накіравальныя пазы *6* (рыс. 9.8) для ўстаноўкі на жадаемым узроўні рашоткі для смажання мяса і бляхі для збору падлівак. Дзверцы жаравай электрашафы зашклёны тэрмастойкім шклом. Левая лямпа на панелі кіравання служыць для сігналізацыі пры дасягненні зададзенай тэмпературы ў электрашафе, а правая — для сігналізацыі пры ўключэнні награвальнікаў жаравай элактрашафы. Адначасовае ўключэнне награвальных элементаў жаравай электрашафы і грыля выключана. Выключэнне награвальных элементаў жаравай электрашафы і грыля адбываецца вярчэннем ручкі супраць ходу гадзіннікавай стрэлкі да становішча «0».

Жаравая электрашафа забяспечваецца аўтарэдуктарам, які змацціраваны са знешняга боку задняй сценкі электрапліты і прызначаны для вярчэння ражноў частатой 2 аб/мін пры смажанні на ім мяса (птушкі). Для смажання мяса (птушкі) насаджваюць яго на ражон, завостраны канец якога ўстаўляецца ў варонку, якая жорстка насаджана на вал аўтарэдуктара, а другі канец абапіраецца на рамку. На панелі кіравання электрапліты, акрамя ўказаных ручак кіравання, размешчана разетка *3* (гл. рыс. 9.7),

якая служыць для ўключэння бытавых электрапрыбораў магутнасцю да 1 кВт, а таксама трохпазіцыйны клавішны пераключальнік *4* на становішчы: нейтральнае, уключэнне аўтарэдуктара і ўключэнне асвятлення жаравай электрашафы. У ніжняй частцы электрашафы размяшчаецца дапаможная скрынка, якая прызначаецца для захоўвання і сушкі посуду.

П е р а н о с н ы я э л е к т р а п л і т к і — гэта бытавыя награвальныя электрапрыборы з адной або некалькімі канфоркамі. Аднаканфорачныя электраплiты выпускаюцца на магутнасць 800, 1000, 1200 і 1500 Вт, а двухканфорачныя — на магутнасць 1600, 1800, 2000, 2200 Вт. Вырабляюцца электраплiткі адкрытага і закрытага тыпу. Электраплiткі закрытага тыпу бяспечныя ў эксплуатацыі, маюць раўнамерны нагрэў паверхні. Час разагрэву працягваецца да 15—20 мін. Цеплыня ад пліткі да пасуды перадаецца цеплаправоднасцю, таму дно посуду павінна быць тоўстым і шчыльна прылягаць да паверхні пліткі. У плітці адкрытага тыпу на награвальную спіраль надзяваюцца ізаляцыйныя керамічныя бусы. Яна змяшчаецца ў танкасценную металічную трубку, якая і з'яўляецца награвальным элементам. У сувязі з малай цеплаёмістасцю нагрэў яго адбываецца за 2—3 мін. На рыс. 9.9 паказана двухканфорачная плітка з трубчастым награвальным элементам «Мэта». Корпус пліты вырабляецца з ліставой сталі і пакрываецца сілікатнай эмаллю. Плітка мае два пераключальнікі магутнасцю на 800, 500 і 190 Вт і на 1000, 500 і 250 Вт.



Рыс. 9.9. Двухканфорачная пліта з трубчастым награвальным элементам

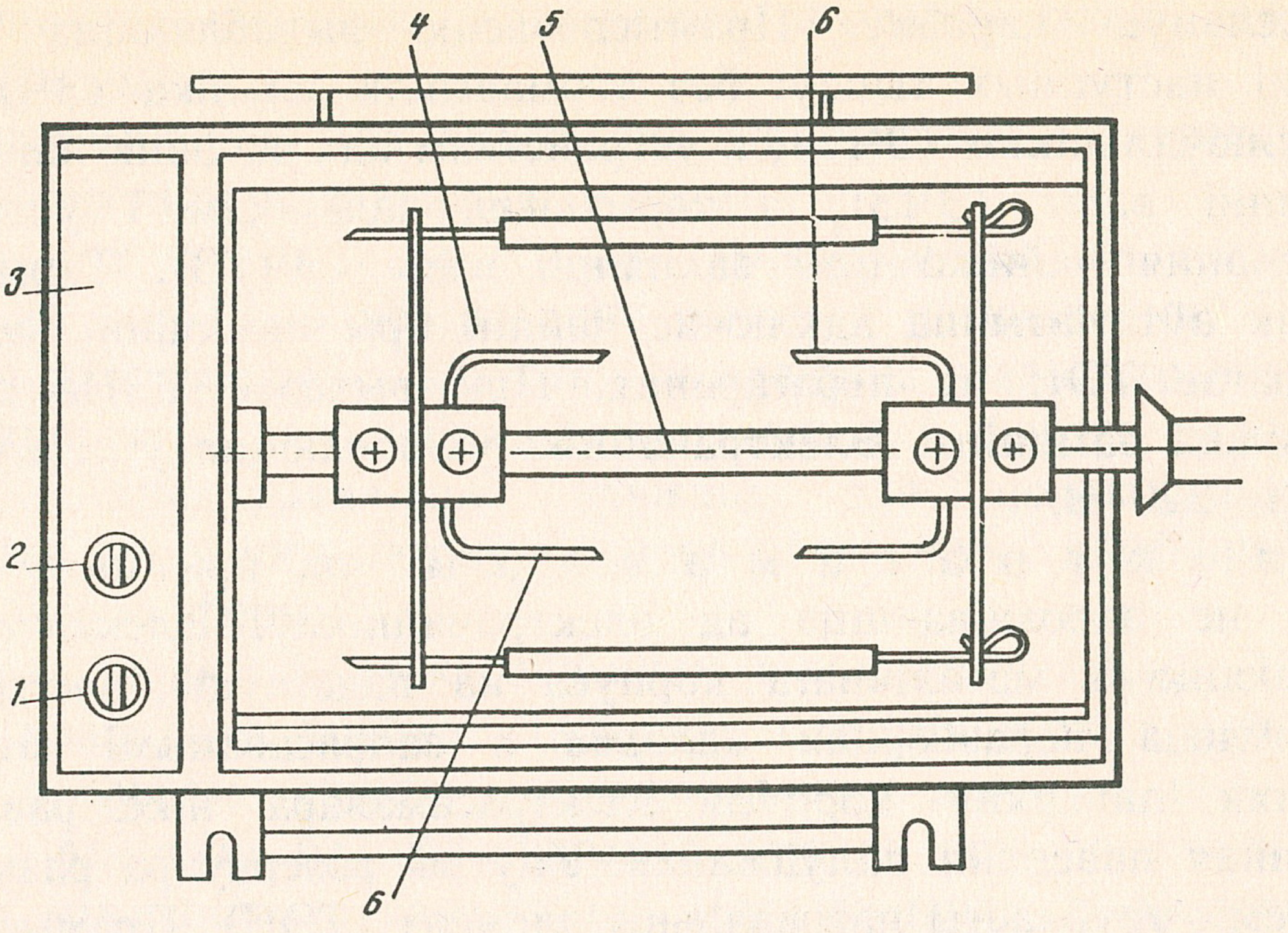
Э л е к т р а к а с т р у л і служаць для прыгатавання ежы і нагрэву вадкасці, уключаюцца ў сетку напружаннем 220 В пасля напаўнення іх вадкасцю. Электракаструлі забяспечваюцца тэрмавыключальнікам, які выключае каструлю з сеткі пры выкіпанні вадкасці. Яны таксама маюць тэрмарэгулятар, які дазваляе рэгуляваць тэмпературу нагрэву вадкасці.

Э л е к т р а п е ч к а «Ц у д а» служыць для выпечкі мучных вырабаў і прыгатавання тушаных страў з мяса, рыбы і

гародніны. Электрапечка складаецца з корпуса і накрыўкі, якая мае назіральнае шкло. На бакавой паверхні накрыўкі маюцца адтуліны для выхаду пары. Награвальныя элементы ўстанаўліваюцца ў корпусе і накрыўцы для раўнамернага абагрэву прадукта з усіх бакоў. Электрапечка мае вынасны пульт кіравання з кнопкавым выключальнікам.

Электракававаркі выпускаюцца наступных тыпаў: вакуумныя (ЭКВ), кампрэсійныя (ЭКК), перкалятарныя (ЭКП) і фільтрацыйныя (ЭКФ). Карпусы і накрыўкі электракававарак вырабляюцца з алюмініевага сплаву, нержавеючай сталі, латуні. Электракававаркі забяспечваюцца тэрмаабмежавальнікам і тэрмавыключальнікам, а таксама рэле часу, светлавой сігналізацыяй і інш. Тэрмаабмежавальнік аўтаматычна адключае кававарку пасля прыгатавання напітку, а тэрмавыключальнік адключае кававарку пры выкіпанні вады, гэта значыць засцерагае награвальны элемент ад перагарання. Электракававаркі вырабляюцца на магутнасць ад 350 да 1 000 Вт і ўключаюцца ў сетку напружаннем 220 В. Прамысловасцю выпускаюцца аўтамабільныя кававаркі «Мэта» магутнасцю 130 Вт для напружання 12 В. Прыгатаванне кавы ва ўсіх кававарках аднолькавае. Наліваюць у рэзервуар неабходную колькасць вады, затым запаўняюць фільтр молатай кавай і ўключаюць кававарку ў сетку. Праз пэўны час гарачая вада або гарачая вада і пара адзін або некалькі разоў (у залежнасці ад тыпу кававарак) праходзяць праз слой кавы, і напітак гатовы.

Электрагрылі (рыс. 9.10) уяўляюць сабой жаравыя шафы з інфрачырвоным нагрэвам. Яны складаюцца з рабочай камеры *4* і прыборнага адсеку *3*, у якім устаноўлены электрапрыборы і электрарухавік тыпу РД-09 для вярчэння ражна *5*. Рабочая камера складаецца з дзвюх бакавінак, задняй сценкі і адкідной дзверцы з цеплаcтойкага шкла. У верхняй частцы камеры маюцца адлюстравальнік і два электранагравальнікі з ніхромавай спіралі ў трубцы з кварцавага шкла. На дно камеры ўстанаўліваецца эмаліраваны паддон для збору сцякаючага жыру або соку. У бакавыя сценкі ўстаўляецца сваімі канцамі ражон *5*. Ражон забяспечваецца двумя перасоўвачнымі трымальнікамі *6* для замацавання птушкі або мяса і шампурамі для прыгатавання шашлыкоў. На сцяне прыборнага адсека размяшчаецца ручка пераключальніка *2* на чатыры палажэнні: 0, I, II і III. Пры ўстаноўцы ручкі пераключальніка ў становішча 0 награвальнік электрагрыля выключаны, пры ўстаноўцы ўказальніка ў становішча I абедзве спіралі награвальніка ўключаюцца паслядоўна (слабы нагрэў), у становішча II — уключаецца адна спіраль награвальніка (сярэдні нагрэў) і ў становішча III —



Рыс. 9.10. Электрагрыль

абедзве спіралі награвальніка ўключаюцца паралельна (максімальны нагрэў). Электрагрылі ўключаюцца ў сетку напружаннем 220 В ручкай *1* і маюць светлавую сігналізацыю ўключэння награвальных элементаў.

Электрашашлычніцы з'яўляюцца электрапрыборамі інфрачырвонага нагрэву і вырабляюцца з гарызантальным і вертыкальным размяшчэннем шампураў. Уключаюцца ў сетку напружаннем 220 В і забяспечваюцца светлавой сігналізацыяй уключэння награвальнага элемента. Электрашашлычніцы маюць электрарухавік, які прыводзіць шампуры ў вярчэнне з частатой 3—4 аб/мін. Прамысловасцю выпускаецца, акрамя адзначаных, яшчэ шэраг электранагравальных прыбораў для прыгатавання страў: электрашафа-тостэр ЭМШ-1,4/220-І2, прызначаны для прыгатавання мясных і рыбных блюд, а таксама піражкоў, шашлыкоў; электрамангал, прызначаны для жарання прадуктаў на ражнах з гарызантальным размяшчэннем чатырох шампураў; электравафельніцы, электражароўні і інш.

Электрапрыборамі для награвання вадкасці з'яўляюцца: электрачайнікі, электрасамавары, электракіпяцільнікі, электраводанагравальнікі.

Электрачайнікі складаюцца з дзвюх асноўных частак: корпуса з алюмінію або нержавеючай сталі і трубчастага награвальнага элемента (ТЭНа), размешчанага паралельна дну чайніка на адлегласці 3—10 мм ад яго. Кантактныя штыфты награвальнага элемента (ТЭНа) выводзяцца на корпус чайніка ў

штэпсельную каробку. Прамысловасцю вырабляюцца электрачайнікі наступных тыпаў: без тэрмавыключальніка (ЭЧ), з тэрмавыключальнікам (ЭЧТ), з устройствам адключэння чайніка пры закіпанні вады (ЭЧЗ), з тэрмавыключальнікам і ўстройствам адключэння чайніка пры закіпанні вады (ЭЧТЗ). Тэрмавыключальнік аўтаматычна адключае чайнік пры выкіпанні вады, чым засцерагае ТЭН ад перагарання. Пры выхадзе ТЭНа са строю яго можна замяніць. Электрачайнікі ўключаюцца ў сетку напружаннем 220 В.

Электрасамавары па прынцыпу дзеяння нічым не адрозніваюцца ад электрачайнікаў. Электрасамавары складаюцца з металічнага корпуса на падстаўцы, унутры якой устаноўлена неразборная калодка з запрасаванымі штэкерамі. Знешняя паверхня корпуса электрасамавара нікеліраваная, а ўнутраная паверхня палуджаная. Унутры рэзервуара размешчаны здымаемы трубчасты награвальны элемент (ТЭН). Прамысловасцю выпускаюцца электрасамавары наступных тыпаў: без тэрмавыключальніка (ЭС), з тэрмавыключальнікам (ЭСТ), з устройствам адключэння самавара пры закіпанні вады (ЭСЗ), з тэрмавыключальнікам і ўстройствам адключэння чайніка пры кіпенні (ЭСТЗ). Электрасамавары падключаюцца ў сетку напружаннем 220 В з дапамогай здымнага электрычнага шнура.

Электракіпяцільнікі выпускаюцца прамысловасцю наступных тыпаў: паглыбныя малога габарыту (ЭПМ), паглыбныя асноўнага габарыту (ЭПА) і паглыбныя асноўнага габарыту з тэрмавыключальнікам (ЭПАТ). Уключаюцца электракіпяцільнікі ў сетку напружаннем 220 В і разлічаны на магутнасць ад 300 Вт да 2 кВт з аб'ёмам вады ад 0,25 л да 7 л.

Электранагравальнікі вырабляюцца двух відаў: са шкляным рэзервуарам і металічным бакам. Электранагравальнік са шкляным рэзервуарам ёмістасцю 6 л мае два награвальныя элементы. Тэмпература награвання вады ўстанаўліваецца тэрмарэгулятарам. Пры дасягненні ўстаноўленай тэмпературы датчык тэмпературы спрацоўвае і награвальнік аўтаматычна адключаецца ад сеткі, а сігнальная лямпачка запальваецца. Аб закіпанні вады ў рэзервуары награвальнік апавяшчае свістком. Электранагравальнік устанаўліваецца над ракавінай на кухні або над ваннай і падключаецца да водаправоднай сеткі з дапамогай трайніка вентыля-змяшальніка, што дае магчымасць змешваць гарачую ваду награвальніка з халоднай вадой водаправода.

Электранагравальнік з металічным бакам прынцыпова нічым не адрозніваецца ад электранагравальніка са шкляным рэзервуарам, толькі мае больш моцныя награвальныя элементы і лепшую

цеплаізаляцыю, што дае магчымасць зберагчы ваду нагрэтай больш доўгі час.

Электрапрыборамі для ацяплення з'яўляюцца: электракаміны, электраканвектары і электрарадыятары.

Электракаміны вырабляюцца для мясцовага абагравання і поўнага абагравання бытавых памяшканняў. Электракаміны для мясцовага абагрэву складаюцца з адлюстравальніка (рэфлектара) і награвальніка, размешчанага ў фокусе адлюстравальніка. Адлюстравальнікі служаць для фарміравання і накіравання цеплавога патоку і маюць сферычную, цыліндрычную і парабалічную формы.

Награвальнікамі ў электракамінах выкарыстоўваюцца ТЭНы, спіралі ў кварцавых трубках, біспіралі, наматаныя на керамічныя стрыжні, а таксама спіралі з аксідзіраванага дроту са шчыльнай намоткай. Аксідная плёнка абараняе спіраль пры шчыльнай намотцы ад міжвітковага замыкання. Награвальнікі са сферычнымі адлюстравальнікамі маюць лямпавы цокаль, а цыліндрычныя награвальнікі аснашчаюцца штыравымі вывадамі.

Электракаміны для абагрэву бытавых памяшканняў забяспечваюцца двума драцянымі электранагравальнікамі. Часта карпусы электракамінаў выконваюцца ў выглядзе звычайнага каміна з выкарыстаннем дэкаратыўных панеляў, якія імітуюць цагельную сценку, дровы або вугаль. Электранагравальнікі і рэфлектар размешчаны ў ніжняй частцы корпуса. Для кожнага электранагравальніка ёсць асобны выключальнік. Рэфлектар для павышэння проціпажарнай бяспекі накіроўвае цеплавы паток наперад-уверх. Для імітацыі гарэння дроў (язычкоў полымя) за рэфлектарам устанаўліваецца электрычная лямпа, а над лямпай вяртушка, якая верціцца патокам цёплага паветра ад лямпы.

Электракаміны ўключаюцца ў сетку напружаннем 220 В і разлічаны на магутнасць 1,25 кВт.

Электраканвектары — ацяпляльныя электрапрыборы з канвекцыйнай цеплааддачай. Яны не маюць рэфлектара і цеплыня ад абагравальніка перадаецца ў памяшканне метадам канвекцыі і часткова выпраменьваннем. Электраканвектары складаюцца з корпуса, які ўяўляе сабой дэкаратыўна аформленую металічную каробку з адтулінамі зверху для выхаду гарачага паветра і адтулінамі знізу для ўваходу халоднага паветра. Унутры корпуса размешчаны награвальны элемент. Награвальным элементам з'яўляюцца ТЭНы або часцей за ўсё спіралі з рэзістарнага сплаву, расцягнутыя на керамічных ізаляцыйных планках. На гэтых планках устанаўліваецца таксама і тэрмавыключальнік, які аўтаматычна адключае электраканвектар пры дасягненні тэмпературы вышэй устаноўленай. Паўторнае ўключэнне электракан-

вектара ажыццяўляецца шляхам націску кнопкі. Электраканвектары ўстанаўліваюцца на падлозе або падвешваюцца на сцяне і падключаюцца да сеткі пераменнага току напружаннем 220 В. Яны разлічаны на магутнасць ад 0,5 да 2 кВт. Прамысловасцю выпускаюцца электраканвектары наступных тыпаў: з аўтаматычным тэрмарэгулятарам, з бесступеньчатым і са ступеньчатым рэгулятарам магутнасці, з тэрмавыключальнікам.

Электрарадыятары — ацяпляльныя прыборы з цеплааддачай выпраменьваннем і канвекцыяй ад знешней паверхні корпуса. Па канструкцыі электрарадыятары падзяляюцца на сухія і з прамежкавым цепланасіцелем, а таксама секцыйныя і панельныя.

У панельных электрарадыятарах з цепланасіцелем корпус уяўляе сабой падвойную вертыкальную панель з рэзервуарам унізе для масла і размяшчэння ў ім награвальніка. Награвальнікамі з'яўляюцца ТЭНы. Унутры корпуса маюцца поласці, па якіх цыркулюе нагрэтае масла і стварае раўнамерны нагрэў паверхні корпуса.

Цяпер вялікае распаўсюджванне атрымліваюць секцыйныя электрарадыятары. Іх корпус складаецца з асобных секцый, якія пры зборцы радыятара зварваюцца ў верхняй і ніжняй частках. У секцыйных электрарадыятарах маюцца вертыкальныя каналы, па якіх цыркулюе нагрэтае масла. У іх пераважае канвекцыйная цеплааддача. Электрарадыятары ўстанаўліваюцца на падлозе або падвешваюцца на сцяне і падключаюцца да пераменнага току напружаннем 220 В. Яны могуць прымяняцца ў якасці асноўнага і дадатковага ацяплення памяшканняў. Прамысловасцю выпускаюцца электрарадыятары наступных тыпаў: масланапоўненыя з тэрмарэгулятарам, масланапоўненыя з бесступеньчатым і ступеньчатым рэгуляваннем магутнасці, масланапоўненыя з тэрмавыключальнікам.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як класіфікуюцца награвальныя электрапрыборы, якія выкарыстоўваюцца ў быце?
2. Якія электрапрыборы прымяняюцца для прыгатавання стравы?
3. Як пабудавана кухонная электрапліта «Электра 1001»?
4. Як карыстацца электраканфоркамі для прыгатавання стравы? Жаравай шафай для смажання мяса (птушкі), выпечкі мучных вырабаў?
5. Як пабудаваны электрапліткі адкрытага і закрытага тыпу, электрагрылі, электрашашлычніцы і як імі карыстацца?
6. Якія электрапрыборы прымяняюцца для награвання вадкасці?
7. Як пабудаваны электрачайнікі, электрасамавары і як імі карыстацца?

8. Якіх тыпаў выпускаюцца электракіпяцільнікі?

9. Як пабудаваны электранагравальнікі са шкляным і металічным бакамі? Для чаго яны служаць?

10. Якія электрапрыборы служаць для ацяплення памяшканняў?

11. Як пабудаваны электракаміны і электраканвектары, сухія і з прамежкавым цепланосьбітам, секцыйныя і панельныя электрарадыятары? Як яны выкарыстоўваюцца ў быце?

9.3. Электраправодка

Для падключэння асвятляльных, награвальных і іншых электрапрымальнікаў у сетку прымяняюцца правады і кабелі, а таксама электраўстановачныя вырабы (выключальнікі, пераключальнікі, штэпсельныя разеткі і інш.). Выбар маркі проваду і кабелю для падключэння прымальнікаў электрычнай энергіі да сеткі залежыць ад магутнасці электрапрымальнікаў, характару памяшкання і метаду пракладкі проваду. Памяшканні бываюць сухія, вільготныя, сырыя, асабліва сырыя, пажаранебяспечныя і памяшканні з хімічна актыўнымі рэчывамі. Да сухіх памяшканняў належаць памяшканні, у якіх адносная вільготнасць паветра не перавышае 60 %. Вільготнымі называюцца памяшканні, у якіх адносная вільготнасць паветра знаходзіцца ў межах 60—75 %. Да сырых належаць памяшканні, у якіх адносная вільготнасць паветра перавышае 75 %, а ў асабліва сырых памяшканнях адносная вільготнасць паветра блізкая да 100 %.

Марку проваду запісваюць у выглядзе спалучэння літар. Літары абазначаюць наступнае: А — жыла алюмініевая (калі гэтай літары няма, то жыла медная); Р — ізаляцыя гумавая; В — ізаляцыя поліхлорвінілавая або полівінілхларыдная; Н — ізаляцыя натрыевая; П — ізаляцыя поліэтыленавая; ПП — провад плоскі; О — ізаляваныя жылы заключаны ў агульную абалонку або аплётку; Т — провад трэба пракладваць у трубках; Г — провад гібкі; Д — провад падвойны; Ш — шнур.

Колькасць жыл і сячэнне іх указваюцца наступным чынам: запісваецца марка проваду; ставіцца рыска; запісваецца колькасць жыл; ставіцца знак множання; запісваецца сячэнне жылы ў квадратных міліметрах.

Для пракладкі правадоў у сухіх ацяпляльных памяшканнях прымяняюцца правады наступных марак: ПРД, ПРІ, АПРІ, ПРГІ, АППР, ПРВД, ПРГН і інш.

Для пракладкі правадоў у сырых памяшканнях прымяняюцца засцярожаныя правады, гэта значыць правады, якія на паверхні электрычнай ізаляцыі маюць металічную абалонку з ПВХ (полівінілхларыднага) пластыката або з негаручай гумы, якая прызначана для герметызацыі і аховы ад знешніх уздзеянняў.

Да іх належаць правады наступных марак: ПРН, АПРН, ПРГН, АПРФ, ПРФ, ПРФл, ПУНП і інш.

У асабліва сырых памяшканнях і з хімічна актыўным рэчывам прымяняюцца кабелі. Па канструкцыі кабелі адрозніваюцца ад правадоў наяўнасцю скручаных разам ізаляваных жыл, якія маюць агульную герметычную абалонку — свінцовую, алюмініевую, гумавую або з пластыка. Па прызначэнні кабелі падзяляюцца на сілавыя, кантрольныя і спецыяльнага прызначэння.

Сілавыя кабелі служаць для падводкі электрычнай энергіі да сілавых установак, асвятляльнай сеткі і прымяняюцца ў асноўным для пракладкі электрычных ліній у зямлі і пад вадой. Кантрольныя кабелі прымяняюцца для дыстанцыйнага ўключэння электравымяральных прыбораў, устройстваў засцярог і кіравання.

У бытавых умовах прымяняюцца кабелі, у якіх паверх ізаляваных жыл маецца гумавая, пластмасавая або металічная абалонка, якая служыць для засцярогі ізаляцыі праводзячых жыл ад уздзеяння вільгаці, святла, розных хімічных рэчываў і ад механічных пашкоджанняў. Да іх належаць кабелі наступных марак: АРГ, АВРГ, НРГ, СРГ, ПВГ, ВВГ, ПсВГ, АПвВГ і інш.

Асноўныя маркі правадоў, кабеляў і вобласць іх прымянення ў бытавой электратэхніцы дадзены ў табл. 9.1.

Табліца 9.1

Марка проваду, кабелю	Назва	Вобласць прымянення
1	2	3
	Правады	
ПРД	Провад з меднай жылай у аплётцы з баваўнянай тканіны, віты	У сухіх ацяпляльных памяшканнях для пракладкі на роліках
ПРІ	Провад з меднай жылай, з гумавай ізаляцыяй, якая валодае ахоўнай уласцівасцю	У асвятляльных і сілавых сетках
ПРГІ	Тое самае, з меднай гібкай жылай	Тое самае

Працяг табл. 9.1

1	2	3
АПРІ	Тое самае, з алюмініевай жылай	У асвятляльных і сілавых сетках
АППР	Провад з алюмініевай жылай, плоскі, з раздзяляльнай асновай	Для пракладкі па драўляных аснаваннях
ПВ	Провад з меднай жылай, з ПВХ ізаляцыяй	Для асвятляльных і сілавых сетак унутры сухіх, сырых і асабліва сырых памяшканняў
АПВ	Тое самае, з алюмініевай жылай	Тое самае
ПП	Провад з меднай жылай, ізаляцыяй з поліэтылену	«
АПП	Тое самае, з алюмініевай жылай	«
ППВ	Провад з меднай жылай, з ПВХ ізаляцыяй, плоскі, з раздзяляльнай асновай для адкрытай праводкі	Для асвятляльных сетак сухіх і сырых памяшканняў
АППВ	Тое самае, з алюмініевай жылай	Тое самае
ППВС	Провад з меднай жылай, з ПВХ ізаляцыяй, плоскі, без раздзяляльнай асновы	Для асвятляльных сетак у сухіх і сырых памяшканнях, для скрытай праводкі, пад тынкоўкай у трубах
АППВС	Тое самае з алюмініевымі жыламі	Тое самае
ПБН	Провад з пластмасавай ізаляцыяй бытавога прызначэння	Для мантажу электрычных званкоў і іншых прыбораў слабага току бытавога прызначэння
АПБН	Тое самае, з алюмініевай жылай	Тое самае
ПРВД	Провад з меднай жылай, гібкі, з гумавай ізаляцыяй, у ПВХ абалонцы	У асвятляльных сетках сухіх ацяпляльных памяшканняў
ПРН	Провад з меднымі жыламі, з гумавай ізаляцыяй, у негаручай гумавай аплётцы	У сілавых і асвятляльных сетках непасрэдна па згараемых асновах

Працяг табл. 9.1

1	2	3
ПРГН	Тое самае, з меднай гібкай жылай	У сілавых і асвятляльных сетках непасрэдна па згараемых асновах
АПРН	Тое самае, з алюмініевай жылай	Тое самае
ПРФ	Провад з меднай жылай, з гумавай ізаляцыяй, у абалонцы са сплаву АМЦ, з фальцаваным швом	У асвятляльных і сілавых сетках у сухіх ацяпляльных памяшканнях
ПРФл	Тое самае, у абалонцы з латуні	Тое самае
АПРФ	Тое самае, з алюмініевай жылай	«
ПУНП	Провад з гумавай або пластмасавай ізаляцыяй з ПВХ пластыката	Для нерухомай пракладкі ў асвятляльных сетках
	Сілавыя небраніраваныя кабелі	
АРГ	Кабель з меднай жылай, гумавай ізаляцыяй, з абалонкай з ПВХ пластыката	У асвятляльных сілавых сетках
НРГ	Кабель з меднымі жыламі, гумавай ізаляцыяй, абалонка з нейрытавай гумы, не распаўсюджвае гарэння	Тое самае
АНРГ	Тое самае, з алюмініевай жылай	«
СРГ	Кабель з меднымі жыламі, гумавай ізаляцыяй, з абалонкамі са свінца	«
ПВГ	Кабель з меднымі жыламі, з пластмасавай ізаляцыяй, у абалонцы з поліэтылену	«
ВВГ	Тое самае, у абалонцы з ПВХ пластыката	«
АВВГ	Тое самае, з алюмініевымі жыламі	«

1	2	3
ПсВГ	Кабель з меднымі жыламі, з пластмасавай ізаляцыяй, у абалонцы з самазатухаючага поліэтылену	У асвятляльных сілавых сетках
АПсВГ	Тое самае, з алюмініевымі жыламі	Тое самае
ПвВГ	Кабель з меднымі жыламі, з пластмасавай ізаляцыяй, у абалонцы з вулканізаванага поліэтылену	«
АПвВГ	Тое самае, з алюмініевымі жыламі	«

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як класіфікуюцца памяшканні для пракладкі электраправодкі?
2. Якія маркі правадоў прымяняюцца для адкрытай электраправодкі ў сухіх ацяпляльных памяшканнях? Як яна выконваецца?
3. Якія маркі правадоў прымяняюцца для скрытай электраправодкі ў сухіх ацяпляльных памяшканнях? Як яна выконваецца?
4. Якія маркі правадоў прымяняюцца для электраправодкі ў сырых памяшканнях? Як яна выконваецца?
5. Якія маркі правадоў прымяняюцца для электраправодкі ў асабліва сырых і ў памяшканнях з ядавітымі рэчывамі? Як яна выконваецца?
6. Як падраздзяляюцца кабелі па іх прызначэнні, як яны ўстроены і дзе прымяняюцца?

22. Зак 5287

10

ВЫТВОРЧАСЦЬ, ПЕРАДАЧА І РАЗМЕРКАВАННЕ ЭЛЕКТРАЭНЕРГІІ

10.1. Электрычныя станцыі

Комплекс машын і збудаванняў, якія служаць для вытворчасці электрычнай энергіі, называецца *электрастанцыяй.* На электрычных станцыях адбываецца працэс пераўтварэння розных відаў энергіі (цеплавой, атамнай, энергіі падаючай вады і ветру) у электрычную.

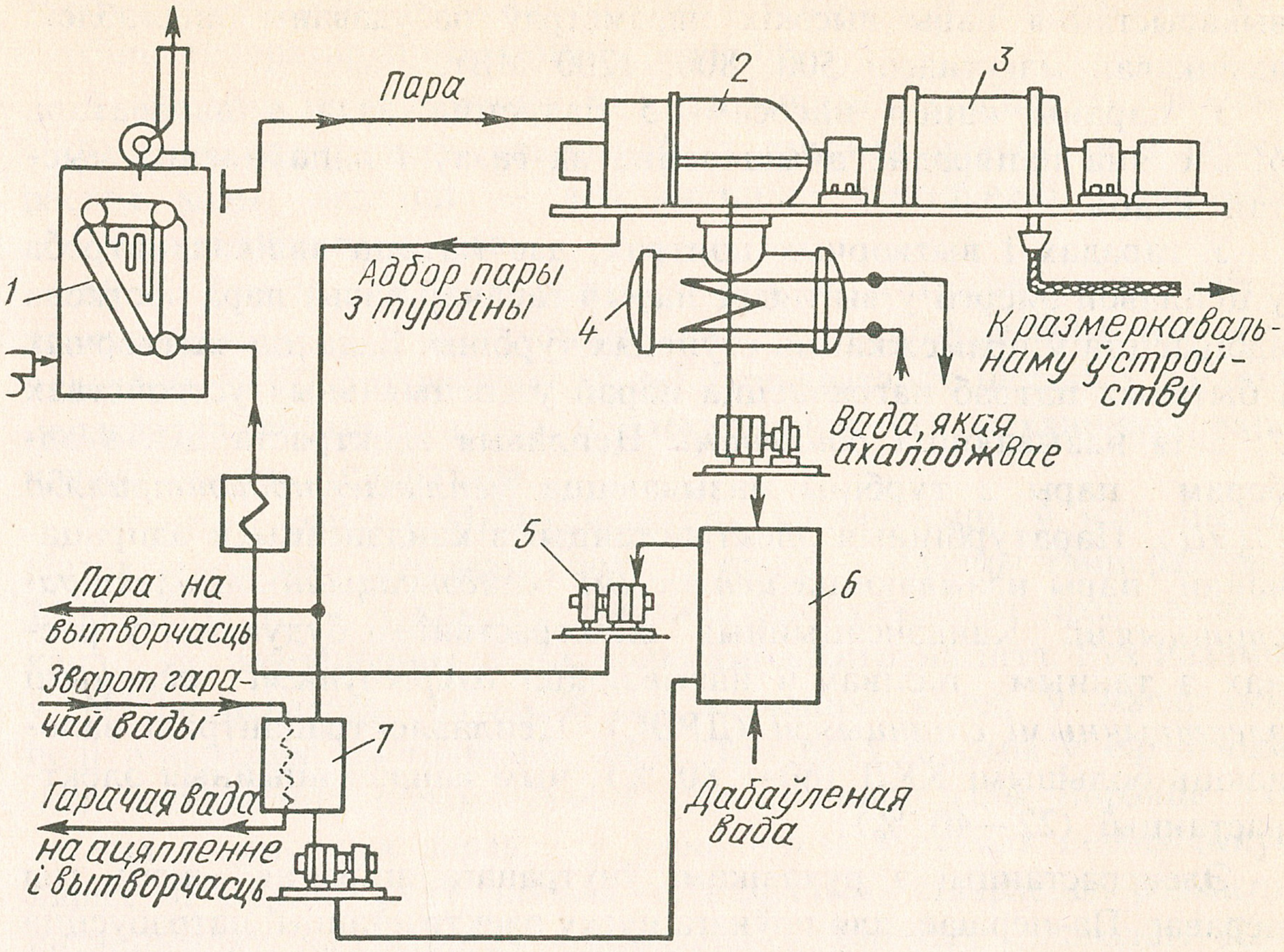
Агульным звяном усіх электрастанцый, незалежна ад іх тыпу, з'яўляецца рухавік. У гэтым звяне адбываецца пераўтварэнне розных відаў энергіі ў механічную. Другім звяном служыць электрычны генератар. У электрычным генератары механічная энергія пераўтвараецца ў электрычную. Амаль на ўсіх электрастанцыях у якасці электрагенератараў прымяняецца трохфазны сінхронны генератар пераменнага току.

Для передачы электраэнергіі ад элекстрастанцыі да спажыўца выкарыстоўваюцца розныя ўстройствы і збудаванні: трансфарматарныя падстанцыі з аўтаматычнымі выключальнікамі, рэлейнай засцярогай і электравымяральнымі шчытамі, кабелі, правады, апоры.

У залежнасці ад віду пярвічнай энергіі, якая пераўтвараецца ў электрычную, электрастанцыі падзяляюцца на цеплавыя, гідраўлічныя, атамныя і ветраныя.

Цеплавыя электрастанцыі бываюць паратурбінныя і з рухавікамі ўнутранага згарання.

П а р а т у р б і н н а я э л е к т р а с т а н ц ы я (рыс. 10.1) складаецца з наступных асноўных частак: паравога катла *1*, паравой турбіны *2*, электрагенератара *3* і размеркавальнага ўстройства. Топка і паравы кацёл сумешчаны ў адным вузле. Топка прадстаўляе вялікую цеплаізаляцыйную камеру, зробленую з вогнетрывалай



Рыс. 10.1. Схема цеплаэлектрацэнтралі (ЦЭЦ)

цэглы. У ёй размяшчаюцца трубы паравога катла, які служыць для атрымання вялікай колькасці пары за кошт згарання паліва. Палівам для паратурбінных электрастанцый з'яўляюцца каменны вугаль, торф, сланцы, нафта, мазут і прыродны газ. Паліва ў топку падаецца ў распыленым выглядзе, што забяспечвае яго поўнае згаранне і павышае ККД паравога катла. У катле вада пад ўздзеяннем цеплыні пераўтвараецца ў пару высокага ціску. Перагрэтая пара высокага ціску па параправодзе трапляе ў паравую турбіну *2* і прыводзіць яе ў вярчэнне. Паравая турбіна сваім валам жорстка змацавана з валам генератара *3*, і вярчэнне турбіны перадаецца генератару. Электрагенератар пры вярчэнні ротара пераўтварае механічную энергію ў энергію электрычнага току. ККД паравой устаноўкі залежыць ад рознасці тэмператур паступальнай пары і пары, якая выходзіць. У турбіну пара з парападагравальніка пастурае пры высокай тэмпературы і вялікім ціску, а адпрацаваная пара з турбіны трапляе ў кандэнсатар *4*, дзе ахалоджваецца праточнай вадой да кандэнсацыі.

У сучасных паратурбінных электрастанцыях прымяняецца пара ціску 13 МПа пры тэмпературы 535—565 °С і 17 МПа пры 550—570 °С. У магутных паратурбінных электрастанцыях прымяняецца пара з параметрамі p = 25 МПа, T = 580 °С. Для

выкарыстання пары высокіх параметраў пабудаваны энергаблокі адзінкавай магутнасці 500, 800, 1200 МВт.

У паравы кацёл насосамі *5* падаецца вада з дэаэратара *6*, дзе яна папярэдне ачышчаецца ад газаў і папаўняецца чыстай вадой.

У гарадах і вытворчых цэнтрах, дзе маецца вялікая патрэба ў цеплавой энергіі ў выглядзе пары і гарачай вады, пара часткова адбіраецца ў прамежкавых ступенях турбіны. Вада для вытворчых і бытавых патрэб награваецца парай у спецыяльных устройствах *7*, якія называюцца *бойлерамі*. Цеплавыя электрастанцыі з адборам пары з турбіны называюцца *цеплаэлектрацэнтралямі (ЦЭЦ)*. Паратурбінныя электрастанцыі з кандэнсацыяй адпрацаванай пары называюцца *цеплавымі кандэнсацыйнымі электрастанцыямі*. Кандэнсацыйныя электрастанцыі будуюцца ў раёнах з танным палівам і называюцца *дзяржаўнымі раённымі электрычнымі станцыямі* (ДРЭС). Цеплаэлектрацэнтралі валодаюць большымі ККД (60— 80 %), чым кандэнсацыйныя электрастанцыі (22—40 %).

Электрастанцыі з рухавікамі ўнутранага згарання маюць рад пераваг. Па-першае, для поўнага пуску электрастанцыі патрабуецца ўсяго некалькі хвілін, у той час як пуск паратурбіннай электрастанцыі займае 1—2 гадзіны. Таму электрастанцыі з рухавікамі ўнутранага згарання можна выкарыстаць у якасці рэзерву. Па-другое, гэтыя электрастанцыі можна будаваць у бязводных раёнах, якія знаходзяцца далёка ад рэк і вадаёмаў. Вялікім недахопам электрастанцый з рухавікамі ўнутранага згарання з'яўляецца выкарыстанне дарагога паліва (бензіну, газу, нафты), а таксама іх невялікая магутнасць. ККД дызельных электрастанцый складае 30—40 %.

Цеплавыя электрастанцыі з рухавікамі ўнутранага згарання шырока прымяняюцца ў сельскай гаспадарцы ў выглядзе перасоўных электрастанцый. Яны выкарыстоўваюцца на малацільных і зернеачышчальных таках, жывёлагадоўчых фермах, у цяпліцах, на будаўнічых пляцоўках. Перасовачная электрастанцыя складаецца з рухавіка ўнутранага згарання, электрагенератара і размеркавальнага шчытка.

Да цеплавых станцый належаць таксама газатурбінныя. Яны складаюцца з наступных асноўных элементаў: кампрэсара, газавай турбіны і электрагенератара. Пры рабоце электрастанцыі атмасфернае паветра ўсмоктваецца кампрэсарам, сціскаецца ў ім і пры ціску 1—1,2 МПа паступае ў камеру згарання. Адначасова ў камеру згарання паступае і паліва. Пасля згарання сумесі газы ствараюць вялікі ціск і накіроўваюцца на лопасці турбіны. На адным валу з

турбінай знаходзіцца ротар электрагенератара. Пры вярчэнні вала турбіны генератар прыходзіць у дзеянне.

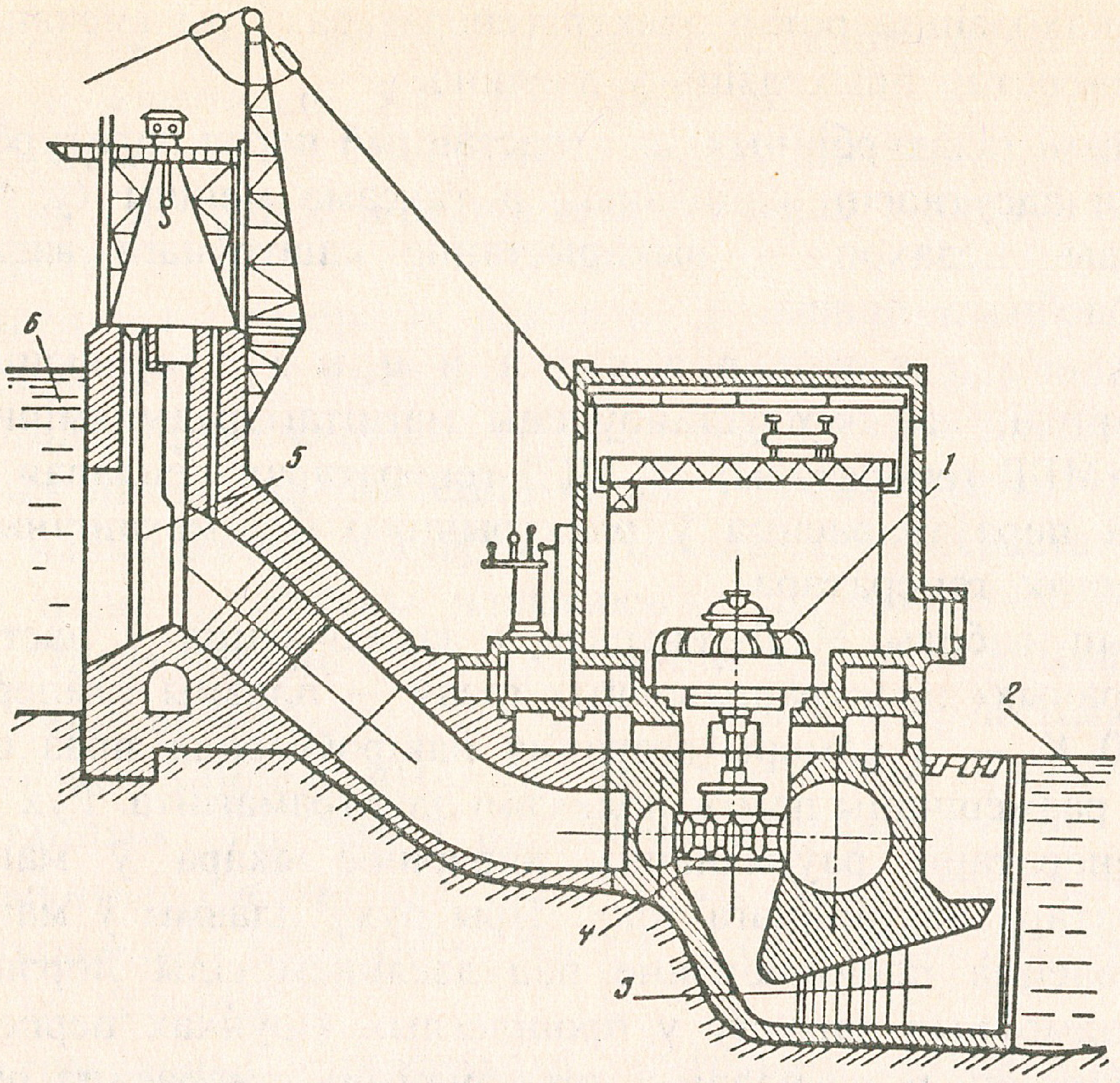
Перавагамі газатурбінных электрастанцый перад паратурбіннымі з'яўляюцца адсутнасць кацельнай, а таксама меншы (у 4 разы) расход вады, недахоп — выкарыстанне каштоўнага вадкаснага або газападобнага паліва.

М Г Д - э л е к т р а с т а н ц ы і ўяўляюць сабой электрастанцыі, на якіх устаноўлены магнітагідрадынамічныя генератары (МГД-генератары). У МГД-генератарах цеплавая энергія непасрэдна пераўтвараецца ў электрычную без механічных вярчэнняў частак генератара.

Прынцып работы МГД-генератара заключаецца ў наступным. Паток «гарачых» электраправодных газаў — плазмы тэмпературай 2500—3000 К — з камеры згарання накіроўваецца праз сапло ў канал, які размешчаны паміж полюсамі электрамагніта. Рух плазмы ў МГД-генератары раўназначны вярчэнню якара ў магнітным полі генератара пастаяннага току. Пры руху плазмы ў магнітным полі адбываецца перамяшчэнне пад дзеяннем сілы Лорэнца дадатных і адмоўных зарадаў у процілеглых кірунках перпендыкулярна да кірунку руху плазмы, гэта значыць ствараецца рознасць патэнцыялаў на полюсах генератара ў дзесяткі кілавольт. Для падключэння ў энергасістэму пастаянны ток з дапамогай інвертараў пераўтвараецца ў пераменны.

Цяпер МГД-генератары выкарыстоўваюцца ў спалучэнні са звычайнай паратурбіннай устаноўкай у якасці высокатэмпературнай падналадкі, сутнасць якой заключаецца ў наступным. У камеры згарання спальваецца паліва і паток газаў тэмпературай 2500—3000 К накіроўваецца ў сапло. Перад саплом у паток «гарачых» газаў упырсківаюцца солі цэзію або калію, адбываецца імгненная іанізацыя, і ў сапле ўжо рухаецца паток плазмы. Затым паток плазмы ўваходзіць у пашыраную частку канала, дзе пры пашырэнні і тармажэнні магнітным полем ахалоджваецца да тэмпературы 2200 К. Пры гэтай тэмпературы іанізацыя газу спадае. Пры выхадзе з канала высокатэмпературны газ праходзіць праз цеплаабменнік паветранагравальніка, праз які кампрэсарам нагнятаюць паветра ў камеру згарання. Пры выхадзе з цеплаабменніка газ тэмпературай 1500 К падаецца ў паратурбіну звычайнай цеплавой электрастанцыі. У паратурбіннай электрастанцыі ў спалучэнні з МГД-устаноўкай павышаецца магутнасць і ККД даводзіцца да 50—60 %.

Г і д р а э л е к т р ы ч н ы я с т а н ц ы і (ГЭС) пераўтвараюць энергію падаючай вады ў электрычную энергію. Асноўнымі агрэгатамі станцый (рыс. 10.2) з'яўляюцца гідратурбіны *4* і электрагенератары *1*. Вал генератара жорстка мацуецца з



Рыс. 10.2. Схема падплацiннай гiдраэлектрастанцыi

валам гiдратурбiны. Вада са сховiшча або напорнага басейна *6* пры падыманнi затвораў *5* па трубах паступае на лопасцi гiдрагенератара. Для раўнамернага вярчэння гiдратурбiн вада на лопасцi падаецца праз спiральную камеру, якая кальцом абхоплiвае кола турбiны, а затым скiдваецца ў раку *2* праз трубу *3*. Колькасць вады, якая праходзiць праз турбiну, рэгулюецца асаблiвым устройствам, якое забяспечвае пастаянства напружання на клемах генератара пры ваганнi нагрузкi.

Магутнасць гiдраэлектрастанцыi залежыць ад энергii падаючай вады, гэта значыць ад вышынi падзення (напора) i масы вады, якая праходзiць праз усе турбiны за адзiнку часу. Па спосабу стварэння напору вады электрастанцыi падзяляюцца на дэрывацыйныя i прыплацiнныя.

Д э р ы в а ц ы й н ы я г i д р а э л е к т р а с т а н ц ы i будуюцца на рэках з вялiкiм падоўжным нахiлам русла, якi перакрываецца плацiнай, частку вады адводзяць да электрастанцыi па дэрывацыйных каналах або вадаводах. Дэрывацыйны канал размяшчаецца па найкарацейшаму шляху, якi мiнуе выгiбы русла ракi, што стварае вялiкi перапад вады i дасягае дзесяткаў i соцень метраў. Пры моцна перасечанай мясцовасцi дэрывацыйны вадавод выконваецца ў выглядзе напорнага трубаправода або тунеля. Колькасць вады ў рэках моцна змяняецца

на працягу года, апрача таго, змяненне нагрузкі на працягу сутак патрабуе рэгулявання патоку вады праз гідратурбіны. Лішак вады з воданапорнага басейна адводзіцца ў раку па халастому вадаскіду.

П р ы п л а ц і н н ы я г і д р а э л е к т р а с т а н ц ы і будуюцца на мнагаводных рэках, дзе напор вады ствараецца плацінай, якая пабудавана папярок ракі і падпірае ваду. На рэках з крутымі берагамі будуюцца высокія бетонныя плаціны ў выглядзе аркі, якая абапіраецца на берагі, а электрастанцыя размяшчаецца ўнізе, за плацінай, і носіць назву *падплацінная ГЭС*. Вада да гідратурбін падводзіцца па металічных трубах, якія праходзяць праз цела плаціны або пад ёй. На рэках з спусцістымі берагамі русла перакрываецца глухой земляной плацінай з прылягаючай да яе вадазліўнай бетоннай плацінай. У выніку гэтага ўтвараецца плацінная вадасховішча, якое займае вялікую тэрыторыю. Вадасховішча Рыбінскай ГЭС займае плошчу 4500 $км^2$, а вадасховішча Волжскай ГЭС імя У. І. Леніна ўтварыла Куйбышаўскае мора плошчай 6500 $км^2$. З боку земляной плаціны ўзводзяць шлюзавы канал, а з боку вадазліўнай будуецца электрастанцыя.

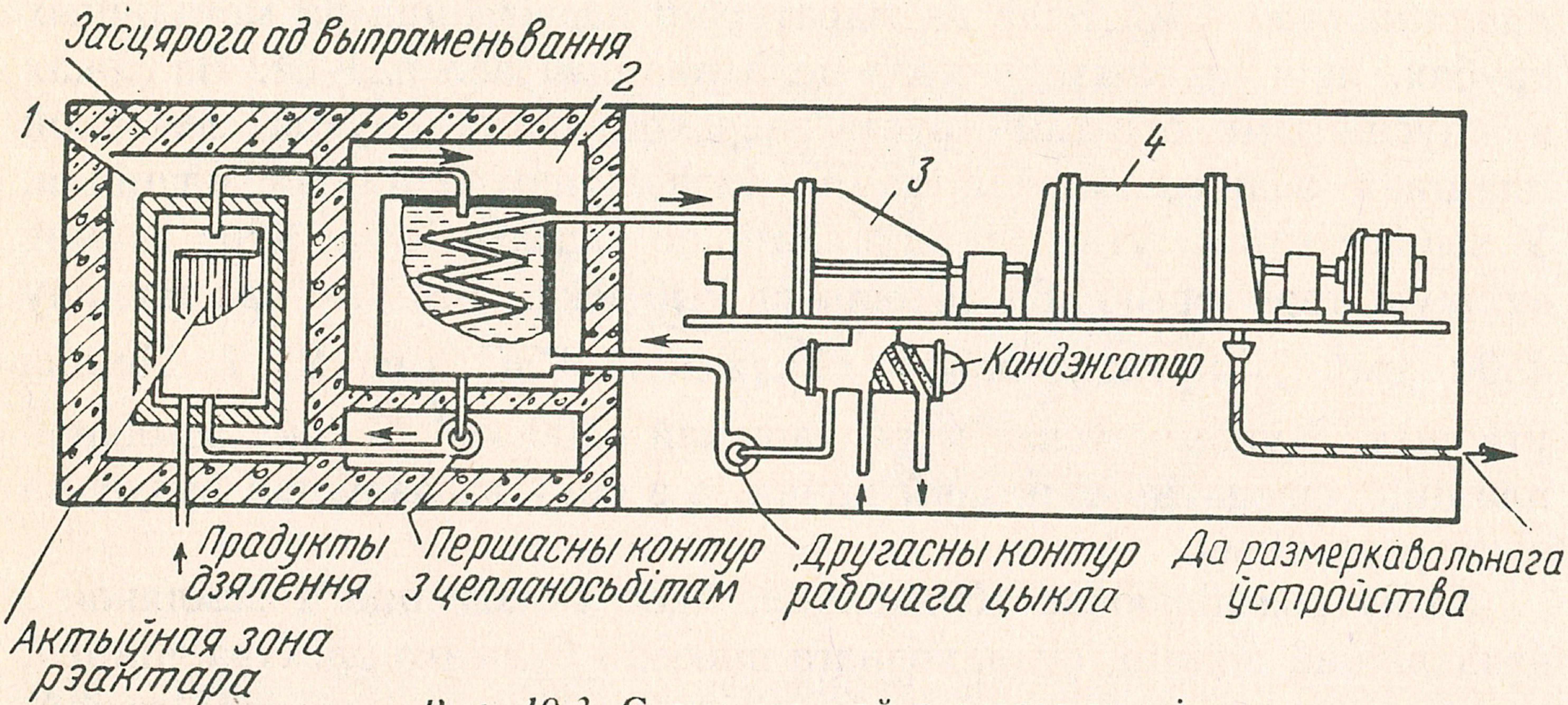
Водаўтрымліваючае збудаванне, якое складаецца з земляной і вадазліўнай плацін, суднаходнага шлюза і будынка электрастанцыі, прасціраецца на вялікую адлегласць (6—10 км) і стварае параўнальна невялікі напор вады.

Лішак вады з вадасховішча скідваецца праз вадазліўную плаціну. Наяўнасць вялікіх вадасховішч дае магчымасць рэгуляваць паток вады праз гідратурбіны, забяспечыць пастаянства магутнасці электрастанцый, а таксама палепшыць умовы суднаходства, пабудаваць сетку арашальных каналаў.

Вялікім дасягненнем нашых энергетыкаў з'яўляецца будаўніцтва магутных ГЭС на мнагаводных рэках Сібіры: Брацкай ГЭС магутнасцю 4,6 млн кВт і Усць-Ілімскай магутнасцю 4,3 млн кВт на Ангары, Краснаярскай магутнасцю 6 млн кВт і Саяна-Шушанскай магутнасцю 6,3 млн кВт на Енісеі.

Да гідраэлектрастанцый належыць аднесці прылiўныя электрастанцыі. У прылiўных электрастанцыях выкарыстоўваецца электраэнергія марскіх прыліваў і адліваў. Для гэтай мэты з дапамогай спецыяльных плацін адгароджваецца частка мора для стварэння перападу ўзроўняў вады паміж штучным басейнам і морам у час прыліву. На гэтых электрастанцыях устанаўліваюцца абарачальныя гарызантальныя турбіны, якія працуюць пры прамым і адваротным патоку вады, гэта значыць пры прыліве і адліве.

На атамных электрастанцыях (АЭС) цеплыня, якая атрымліваецца ад дзялення ядзер цяжкіх элементаў, пераўтвараецца ў электрычную энергію з дапамогай паравых турбін і электрычных генератараў. Атамная электрастанцыя, схематычна адлюстраваная на рыс. 10.3, змяшчае ўсе элементы звычайнай цеплавой электрастанцыі. У ядзерным рэактары, які замяняе топку катла, адбываецца дзяленне ядзер урану (^{235}U) і плутонію (^{239}Pu) з вялікім выдзяленнем цеплавой энергіі, якая і награвае цепланосьбіт.



Рыс. 10.3. Схема атамнай электрастанцыі

Ядзерны рэактар *1* уяўляе сабой графітавы куб або цыліндр вялікіх памераў, пранізаны алюмініевымі, цырконіевымі, магніевымі або з нержавеючай сталі трубамі, унутр якіх уводзяцца ўранавыя стрыжні, а таксама стрыжні кіравання работай катла. Ланцуговую рэакцыю ствараюць нейтроны. Пры гэтым нейтроны павінны мець пэўную (цеплавую) хуткасць, каб выклікаць далейшае дзяленне ядзер. Залішне павольныя і залішне хуткія нейтроны захопліваюцца ядрамі урану і не выклікаюць іх дзялення. Хуткасці нейтронаў, якія вылятаюць з ядра ўрану пры яго дзяленні, запавольваюцца. Запавольнікамі нейтронаў пры ядзерных рэакцыях могуць быць: графіт, цяжкая вада, звычайная вада і берылій. У атамным рэактары, які адлюстраваны на рыс. 10.3, запавольнікам з'яўляецца графіт, і хуткія нейтроны, якія вылятаюць з уранавага стрыжня, пры праходжанні праз слой графіту запавольваюцца і выклікаюць дзяленне ядра ў суседнім уранавым стрыжні. Пры дзяленні ядра урану атрымліваюцца новыя нейтроны і адбываецца рэакцыя ядзернага распаду ўрану. Ланцуговая рэакцыя ідзе вельмі хутка і пры гэтым выдзяляецца вялікая колькасць энергіі, што можа выклікаць выбух вялікай магутнасці. Для прадухілення выбуху

ў атамны кацёл уводзяцца стрыжні (паглынальнікі) з кадмію, карбіду бору, срэбра, індыю і гафнію, якія абмяжоўваюць колькасць нейтронаў і не даюць магчымасці хутка развівацца ланцуговай рэакцыі. Значыць, з дапамогай стрыжняў, якія паглынаюць павольныя нейтроны, можна кіраваць работай атамнага рэактара.

Цеплыня з атамнага рэактара *1* адводзіцца па трубах да парагенератара *2* з дапамогай цепланосьбіта. Цепланосьбітам могуць служыць вада, цяжкая вада, газ або вадкі метал (натрый, калій). У парагенератары цеплата з цепланосьбіта праз сценкі труб перадаецца вадзе і ператварае яе ў пару высокага ціску, якая па трубах паступае ў турбіну *3* і прыводзіць яе ў вярчэнне, а разам з ёй і ротар электрагенератара *4*. Такім чынам, на атамных электрастанцыях ажыццяўляецца пераўтварэнне атамнай энергіі ў электрычную.

На цяперашніх дзейных атамных электрастанцыях выкарыстоўваюцца рэактары трох тыпаў: графітавыя канальныя РБМК-1000 і РБМК-1500, вада-вадзяныя корпусныя ВВЭР-440 і ВВЭР-1000 і рэактары на хуткіх нейтронах БН-600. Рэактары РБМК-1000 з'яўляюцца аднаконтурнымі, маюць канальную канструкцыю з графітавым запавольнікам. Цепланосьбітам з'яўляецца паравадзяная сумесь, якая адводзіцца з актыўнай зоны да барабанаў-сепаратараў. Высушаны ў іх пар пад ціскам 7 МПа пры тэмпературы 290 °С накіроўваецца ў турбіну. Рэактар РБМК-1000 на АЭС размяшчаецца ў бетоннай шахце плошчай $21{,}6\times21{,}6$ м^2 і вышынёй 25,5 м. Палівам у рэактары РБМК-1000 з'яўляецца уран $^{235}_{92}U$. Цеплавыя нейтроны, запаволеныя графітам, захопліваюцца ўранам і выклікаюць дзяленне ядра на два асколкі (ёд $^{135}_{53}J$ і стронцый $^{100}_{38}Sr$) з выпраменьваннем γ-кванта:

$$^{235}_{92}U(n,\gamma) \longrightarrow {}^{135}_{53}J \xrightarrow[6{,}8\ \text{гадз}]{\beta-} {}^{135}_{54}Xe \xrightarrow[9{,}2\ \text{гадз}]{\beta-} {}^{135}_{55}Cs\,.$$
$$\searrow {}^{100}_{38}Sr$$

У выніку распаду асколкаў ёду $^{135}_{53}J$ ($T_{1/2}$ = 6,8 гадз) адбываецца β-выпраменьванне і ўтварэнне ксенону $^{135}_{54}Xe$ з перыядам паўраспаду $T_{1/2}$ = 9,2 гадз. Пры напаўненні паліва асколкамі $^{135}_{54}Xe$ памяншаецца рэактыўнасць рэактара. Гэта з'яўляецца асноўнай прычынай атручвання рэактара, яго зашлакоўвання. У выніку распаду $^{135}_{54}Xe$ ідзе β-выпраменьванне і ўтварэнне цэзію $^{135}_{55}Cs$ — хімічна радыеактыўнага элемента, які лёгка

23. Зак 5287

загараецца на паветры. Маецца 22 радыеактыўныя ізатопы цэзію з перыядам паўраспаду $T_{1/2}$ = 3,2 гадз.—26,6 г. Стронцый $^{100}_{38}Sr$ — радыеактыўны элемент, мае ізатопы з перыядам паўраспаду $T_{1/2}$ = = 6,4 дн. — 27,7 г.

У рэактары РБМК-1000 ідзе таксама пераўтварэнне $^{235}_{92}U$ у плутоній $^{239}_{94}Pu$ пры захопе павольных нейтронаў, γ- і β-выпраменьванні:

$$^{235}_{92}U(n,\gamma) \longrightarrow {}^{236}_{92}U(n,\gamma) \longrightarrow {}^{237}_{92}U \xrightarrow[6{,}7\ \text{сут}]{\beta-} {}^{237}_{93}Np(n,\gamma) \longrightarrow$$

$$\longrightarrow {}^{238}_{93}Np \xrightarrow[21\ \text{сут}]{\beta-} {}^{238}_{94}Pu\,.$$

Плутоній — радыеактыўны элемент, мае шэраг ізатопаў. Практычнае значэнне мае цяжкі ізатоп $^{239}_{94}Pu$ з перыядам паўраспаду $T_{1/2} = 2{,}44 \cdot 10^4$ г. Гэты ізатоп, як і $^{235}_{92}U$, дзеліцца пад уздзеяннем павольных нейтронаў на два асколкі з выдзяленнем велізарнай колькасці энергіі і выкідваннем 2—3 нейтронаў, якія і падтрымліваюць ланцуговую рэакцыю дзялення.

Прыродны ўран змяшчае 0,714 % урану ^{235}U і ўран ^{238}U. У рэактар РБМК-1000 загружаецца 190 т абагачанага ўрану дабаўкай ^{235}U да 20 кг/т. Адпрацаваны ўран утрымлівае 5 кг/т урану ^{235}U і 3 кг/т плутонію (^{239}Pu + ^{241}Pu).Частка ўрану ^{238}U пры захопе хуткіх нейтронаў у рэктары пераўтвараецца ў плутоній з перыядам паўраспаду $T_{1/2} = 2{,}44 \cdot 10^4$ г.

$$^{238}_{92}U(n,\gamma) \longrightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow[23\ \text{мін}]{\beta-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow[2{,}3\ \text{сут}]{\beta-} {}^{239}_{94}Pu\,.$$

У рэактарах РБМК-1000 дапускаецца замена кожныя суткі 2—5 цеплавыдзяляемых уранавых элементаў (твэлаў) без спынення рэактара. Рэактарамі РБМК-1000 аснашчаны Ленінградская і Курская АЭС па чатыры энергаблокі, Чарнобыльская АЭС — тры энергаблокі, Смаленская АЭС — два энергаблокі, а на Ігналінскай АЭС былі ўстаноўлены два энергаблокі па 1500 МВт (РБМК-1500). У дванаццатай пяцігодцы дадаткова ўстаноўлены два рэактары РБМК-1000 на Смаленскай і Курскай АЭС, а на

Ігналінскай АЭС — трэці рэактар РБМК-1500. Будаўніцтва новых АЭС з рэактарамі РБМК не плануецца.

Вада-вадзяныя корпусныя рэактары бываюць двух тыпаў: ВВЭР-440 і ВВР-1000. Рэактары магутнасцю 440 МВт устаноўлены на Кольскай АЭС — чатыры энергаблокі, на Ровенскай — два энергаблокі і два энергаблокі на Нававаронежскай АЭС. У апошні час на дзейных і на нанава пабудаваных АЭС устанаўліваюцца энергаблокі з рэактарамі ВВЭР-1000. Упершыню рэактар ВВЭР-1000 быў устаноўлены на Нававаронежскай АЭС у 1980 г. Рэактар ВВЭР-1000 уяўляе сабой цыліндрычны сасуд, які складаецца з корпуса дыяметрам 4,5 м і вышынёй 10,85 м і здымнага верхняга блока са сферычнай накрыўкай. Корпус вырабляецца з высакаякаснай хромамалібдэнаванадзіевай сталі. Корпус рэактара знаходзіцца пад высокім ціскам (16 МПа) і падвяргаецца ўздзеянню нейтроннага патоку. Унутры корпуса размяшчаецца актыўная зона — уранавыя стрыжні, якія з'яўляюцца цеплавыдзяляльнымі элементамі (твэламі) у абалонках з каразійна-ўстойлівых цырконіевых сплаваў.

ВВЭР-1000 — двухконтурны рэактар. Першы рэактарны контур звязаны з актыўнай зонай рэактара, і вада ў ім з'яўляецца цепланосьбітам і запавольнікам нейтронаў. Другі контур звязаны з паравой турбінай, і пара ў ім пры ціску 6,7 МПа і тэмпературы 289 °С падаецца ў турбіну. Рэактар ВВЭР-1000 размяшчаецца ўнутры герметычнай жалезабетоннай абалонкі дыяметрам 47,7 м, а вышынёй 67,5 м. Акрамя гэтага, унутры абалонкі рэактар і парагенератар раздзяляюцца жалезабетоннай сцяной таўшчынёй 1—1,5 м.

Цеплавыдзяляльнымі элементамі (твэламі) у рэактарах ВВЭР-1000 з'яўляюцца цеплавыдзяляльныя зборкі (ЦВЗ) з абагачаным уранам ^{235}U да 4,4 %. З прыроднага ўрану атрымліваецца толькі 10 % урану, які абагачаны уранам ^{235}U да 44 %, а 90 % прыроднага ўрану ідзе ў адвал. У рэактары ВВЭР-1000 загружаецца 66 т урану, абагачанага дабаўкай ^{235}U да 44 кг/т. Выгружаны ўран змяшчае 12,6 кг/т урану ^{235}U і 7,4 кг/т плутонію $^{239}Pu + ^{241}Pu$, гэта значыць, астаткі нявыкарыстанага матэрыялу радыеактыўныя. Загрузка паліва адбываецца штогод заменай 1/3 першапачатковай загрузкі пры спыненні рэактара і зняцці накрыўкі, што з'яўляецца яго недахопам. Тым не менш двухконтурная схема АЭС з рэактарам ВВЭР-1000 лічыцца больш надзейнай у эксплуатацыі, замкнутасць рэактарнага контуру абмяжоўвае выхад радыяцыі за межы рэактара. ККД АЭС з рэактарамі ВВЭР-1000 вышэйшы за ККД АЭС з рэактарамі РБМК-1000,

яны меншыя па габарытах і патрабуюць менш сталі і іншага матэрыялу для іх збудавання. Рэактарамі ВВЭР-1000 аснашчаны Запарожская, Паўднёва-Украінская, Калінінская, Балакаўская, Хмяльніцкая, Башкірская і Татарская АЭС — па чатыры энергаблокі, на Ровенскай АЭС устаноўлены два энергаблокі з рэактарамі ВВЭР-440 і два энергаблокі з рэактарамі ВВЭР-1000. Перавага рэактараў ВВЭР-1000 дае магчымасць на іх аснове ажыццяўляць развіццё атамнай энергетыкі ў бліжэйшай будучыні.

Пераўтварэнне ^{235}U пры захопе хуткага нейтрона ў радыеактыўны плутоній ^{239}Pu дало магчымасць пабудаваць атамныя рэактары на хуткіх нейтронах. Першы рэактар на хуткіх нейтронах магутнасцю 350 МВт (БН-350) быў устаноўлены ў г. Шаўчэнка ў 1973 г. У 1980 г. уведзены ў дзеянне рэактар БН-600 на Белаярскай АЭС. У праекце запланавана будаўніцтва дзвюх БН-800 на Паўднёва-Уральскай АЭС. Рэактары БН-600 трохконтурныя бакавага тыпу. Корпус рэактара ўяўляе сабой бак цыліндрычнай формы з эліптычным днішчам і канічнай верхняй часткай. Унутры корпуса размяшчаюцца камера з актыўнай зонай, зона ўзнаўлення, а таксама ўнутрыкорпусная біялагічная засцярога. Цепланосьбітам у першым і прамежкавым контурах з'яўляецца вадкі натрый. Пры выкарыстанні натрыю ў якасці цепланосьбіта адсутнічае высокі ціск у корпусе рэактара, паколькі тэмпература кіпення натрыю 842 °С. У параўнанні з водным цепланосьбітам вадкі натрый займае меншы аб'ём, што вядзе да змяншэння дыяметра трубаправодаў і забяспечвае высокае ўдзельнае энергавыдзяленне ў актыўнай зоне (400—800 МВт/м^3). Змяншэнне памераў актыўнай зоны ў рэактарах БН-600 павялічвае вылятанне нейтронаў з актыўнай зоны да 30 %. Для выкарыстання гэтых нейтронаў актыўную зону акружаюць узнаўленчым экранам, які змяшчае абеднены (адвальны) уран, дзе ^{238}U пераўтвараецца ў ^{239}Pu . Ядзерным палівам для рэактара БН-600 з'яўляецца сумесь плутонію і абедненага ўрану, што дае магчымасць паўней выкарыстоўваць прыродны ўран (прыкладна ў 20 разоў), чым у рэактарах на запаволеных нейтронах. Высокая тэмпература натрыевага цепланосьбіта забяспечвае атрыманне пары высокай тэмпературы 505 °С і вялікага ціску 14 МПа, што дае магчымасць выкарыстоўваць серыйныя паравыя турбіны паратурбінных установак ЦЭС. Высокая тэмпература і нізкі ціск металічных цепланосьбітаў, а таксама ачыстка і паўторнае выкарыстанне адвальнага (абедненага) урану забяспечваюць поўнае выкарыстанне прыроднага ўрану, характарызуюць рэактары тыпу БН як аснову электраэнергетыкі на бліжэйшую будучыню.

У перспектыве распрацоўваецца тэхналогія на збудаванне энергаблокаў з рэактарамі БН-1600. АЭС маюць перавагу ў параўнанні з электрастанцыямі іншых тыпаў. Замена топкі з хімічным гаручым ядзерным рэактарам, адсутнасць спецыяльных складскіх памяшканняў пад паліва (вугаль, торф, нафту) робяць АЭС значна чысцейшымі за цеплавыя электрастанцыі. ЦЭС на арганічным паліве спажывае значную колькасць кіслароду, выкідвае ў атмасферу вялікую колькасць аксідаў азоту і серы, а таксама попелу, які змяшчае радыеактыўныя нукліды. АЭС не забруджвае атмасферу, не спажывае кіслароду. Цяжкая аварыя на Чарнобыльскай АЭС абумоўлена недапушчальным парушэннем эксплуатацыйнага рэгламенту і недасканаласцю канструкцыі рэактараў РБМК. Існуюць як дзяржаўныя, так і міждзяржаўныя нормы, прынятыя Міжнародным агенцтвам (МАГАТЭ), якія трэба строга выконваць. Тым не менш бяспека на АЭС мае асаблівае значэнне. Пры сучасных інжынерных канструкцыях і тэхналогіі АЭС утойваюць у сабе вялікую небяспеку і аварыя можа абярнуцца цяжкай трагедыяй. Акрамя гэтага, адходы АЭС маюць астаткавую радыеактыўнасць і патрабуюць надзейнага бяспечнага пахавання.

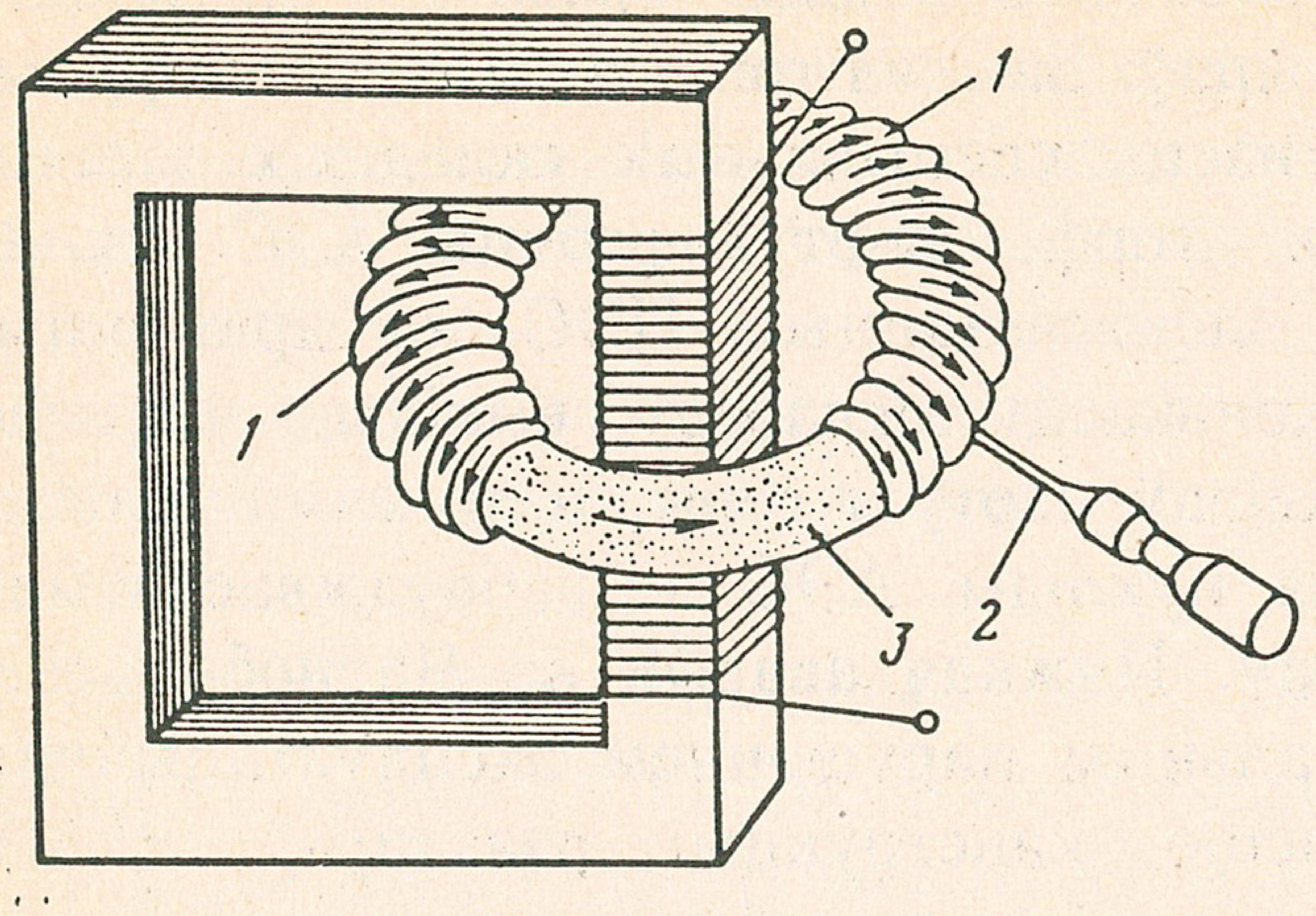
Ва ўсіх атамных рэактарах адбываецца распад атамаў урану на два «асколкі», якія разлятаюцца ў розныя бакі з каласальнымі хуткасцямі, чым і вызначаецца велізарная энергія распаду атама.

Новыя накіраванні пошуку крыніц энергіі прывялі да праблемы кіравання тэрмаядзернай рэакцыяй сінтэзу. Найбольш даступнай для практычнага выкарыстання з'яўляецца тэрмаядзерная рэакцыя сінтэзу цяжкіх атамаў ізатопаў вадароду — дэйтэрыю і трыцію і атрымання ядзер гелію з выдзяленнем велізарнай энергіі. Напрыклад, пры рэакцыі сінтэзу $D + T \rightarrow {}^{4}He + n + 17{,}58$ МэВ выдзяляецца 17,58 МэВ энергіі.

Аналагічныя рэакцыі сінтэзу адбываюцца на Сонцы і на іншых зорках і служаць крыніцай іх энергіі і ўтварэння ядзер хімічных элементаў. Імгненнае выдзяленне вялікай колькасці энергіі прыводзіць да выбуху, што з'явілася штуршком да стварэння вадароднай бомбы.

Для пачатку рэакцыі тэрмаядзернага сінтэзу сумесь дэйтэрыю і трыцію награваюць да тэмпературы парадку $(9—10) \cdot 10^{7}$ °С. Неабходная тэмпература запальвання тэрмаядзернай рэакцыі сінтэзу ствараецца выбухам атамнага ${}^{239}Pu$ або ${}^{235}U$ «запалу».

У мэтах практычнага мірнага выкарыстання велізарнай энергіі тэрмаядзернага сінтэзу неабходна навучыцца ім кіраваць, гэта значыць атрымліваць высокатэмпературную плазму і кіраваць ёю. Таму ў інстытуце атамнай энергіі імя І. В. Курчатава была пабудавана эксперыментальная ўстаноўка «Токамак-10» (та-



Рыс. 10.4. Схема «Токамака»

раідальная камера, магнітная катушка), якая ўяўляе сабой (рыс. 10.4) замкнутую ў кольца вакуумную камеру *3* з нержавеючай сталі, змешчаную ўнутры тараідальнага саленоіда *1*. Камера з разрэджанай сумессю дэйтэрыю і трыцію з'яўляецца другаснай абмоткай трансформатара, у якой узбуджаецца электрычны ток уздоўж восі камеры да 800 тыс. А, які разагравае плазму ўнутры камеры да тэмпературы 1—2 кэВ (1 эВ адпавядае 11 600 К).

Павышэнне тэмпературы плазмы ажыццяўляецца шляхам інжэкцыі, увядзення ў яе інтэнсіўных пучкоў хуткіх атамаў вадароду і дэйтэрыю, або з выкарыстаннем звышвысокачастотных электрамагнітных палёў.

Спачатку атрыманая плазма разаграваецца ўласным токам, а затым дадаткова інжэктарамі *2*, пасля чаго некалькі мінут адбываецца самападтрымліваючая тэрмаядзерная рэакцыя. Зараджаныя часцінкі плазмы ўтрымліваюцца прыблізна адну секунду, затым яны ўзаемадзейнічаюць са сценкай камеры. Пры гэтым матэрыял сценкі выпарваецца і трапляе ў плазму. Плазма ахалоджваецца і рэакцыя спыняецца. Для ўтрымання плазмы, яе ізаляцыі ад сценак камеры выкарыстоўваецца магнітнае поле току самой плазмы, якое сціскае яе, і магнітнае поле току звышправоднага тараідальнага саленоіда магутнасцю да 200 МВт.

Цяпер пад кіраўніцтвам МАГАТЭ аб'яднаны намаганні вучоных СНД, ЗША, Японіі і краін Еўропы для распрацоўкі і збудавання інтэрнацыянальнага тэрмаядзернага рэактара сінтэзу «Інтэр».

Г е л і я с т а н ц ы я ўяўляе сабою электрастанцыю па пераўтварэнні сонечнай энергіі ў электрычную. У Крыму (г. Алушта) пабудавана геліястанцыя, якая складаецца з 1600 геліястатаўлюстраў плошчай па 25 $м^2$. Геліястаты размешчаны вакол сонечнага парагенератара барабаннага тыпу з вытворчасцю 28 т/гадз пары ціскам 4 МПа і тэмпературай 250 °С.

Геліястаты размешчаны кругом вежы ў 20 кальцавых радоў і маюць сістэму прывода, які назірае за рухам Сонца. Крымская

геліястанцыя выпрацоўвае да 7 млн кВт·гадз электраэнергіі ў год.

Ветраэлектрычныя станцыі (ВЭС) пераўтвараюць энергію ветру ў электрычную. Яны складаюцца з ветрарухавіка і электрычнага генератара. Ветрарухавік прадстаўляе кола з вялікімі лопасцямі, звязанае сістэмай зубчатых перадач з электрагенератарам. Паветраныя масы, якія рухаюцца, прыводзяць у вярчэнне кола з лопасцямі, а разам з ім і ротар генератара. Магутнасць электрастанцый невялікая. Работа іх залежыць ад наяўнасці ветру, а на выпадак зацішша яны забяспечаны рэзервовай дызельнай электрастанцыяй.

Будуюць такія электрастанцыі ў сельскіх стэпавых раёнах з устойлівымі вятрамі.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Што называецца электрычнай станцыяй?
2. Як падзяляюцца электрастанцыі па выгляду пярвічнай энергіі?
3. Якія бываюць цеплавыя электрастанцыі?
4. З якіх асноўных вузлоў складаецца ЦЭЦ? ДРЭС? АЭС? Растлумачце прынцып іх работы. Укажыце станоўчыя бакі і недахопы.
5. Як пабудаваны рэактар РБМК-1000? ВВЭР-1000? Рэактар на хуткіх нейтронах БН?
6. З якіх асноўных вузлоў складаецца «Токамак»? МГД-генератар? Растлумачце прынцып іх работы.
7. Як працуе МГД-генератар у блоку з паратурбінным генератарам?
8. Як пабудавана геліястанцыя? Растлумачце прынцып яе работы.

10.2. Перадача і размеркаванне электрычнай энергіі

Раённыя электрастанцыі (ДРЭС) і гідраэлектрастанцыі (ГЭС) будуюцца ў месцах з наяўнасцю залягання вугалю, торфу, сланцаў, прыроднага газу, з вялікімі рэкамі, а спажыўцы электраэнергіі звычайна знаходзяцца на адлегласці дзесяткаў і сотняў кіламетраў ад электрастанцыі. Перадача электраэнергіі ад электрастанцыі да спажыўцоў ажыццяўляецца з дапамогай ліній электраперадачы.

Лініі электраперадачы бываюць паветраныя і кабельныя. Паветраныя лініі будуюцца для перадачы электраэнергіі на вялікія адлегласці праз маланаселеныя раёны і сельскую мясцовасць, а кабельныя — у гарадах і прамысловых

цэнтрах. Пры перадачы электраэнергіі у правадах і кабелях адбываюцца страты электраэнергіі, якія вызначаюцца формулай Джоўля—Ленца ($Q = I^2rt$). Для змяншэння страт у правадах пажадана зменшыць іх супраціўленне, гэта значыць узяць правады вялікага сячэння, але гэта прыводзіць да значнага павелічэння затрат металу і падаражання апор. Мэтазгодна зменшыць ток (змяншэнне току ў два разы дае змяншэнне страт у чатыры разы), але для захавання перадаваемай магутнасці ($P = IU$) неабходна ў столькі ж разоў павялічыць напружанне. На вялікія адлегласці пераменны электрычны ток перадаецца пад напружаннем 20, 35, 110, 150, 220, 330, 550, 750 і 1150 кВ, а пастаянны ток — 1500 кВ.

Лініі электраперадачы пры напружанні 380 В (з заземленай нейтраллю), 220 і 127 В называюцца *нізкавольтнымі*. Нізкавольтныя лініі электраперадачы прымяняюцца ў размеркавальных сетках, гэта значыць у электрасетках, якія злучаюць калгасныя і цэхавыя падстанцыі са спажыўцамі.

На адлегласць у 1000 і больш кіламетраў перадача электраэнергіі пераменным токам нявыгадная з-за вялікіх страт у правадах і парушэння сінхроннасці работы генератараў. На такія адлегласці можна перадаваць электраэнергію толькі пастаянным токам. Трохфазныя генератары і асінхронныя рухавікі праменнага току прасцейшыя па канстукцыі, таннейшыя і больш надзейныя ў рабоце, таму мэтазгодна электрастанцыі будаваць з трохфазнымі генератарамі, прымальнікамі мець асінхронныя рухавікі, а перадачу электраэнергіі весці пастаянным токам. З гэтай мэтай паблізу электрастанцыі за трансфарматарам, які павышае напружанне, ставяцца выпрамнікі, якія пераўтвараюць пераменны ток у пастаянны высокага напружання. Пастаянны ток высокага напружання па паветраных лініях перадаецца на вялікія адлегласці, а ў раёне спажывання з дапамогай інвертараў пераўтвараецца ў пераменны ток высокага напружання і пасля паніжэння напружання перадаецца спажыўцам.

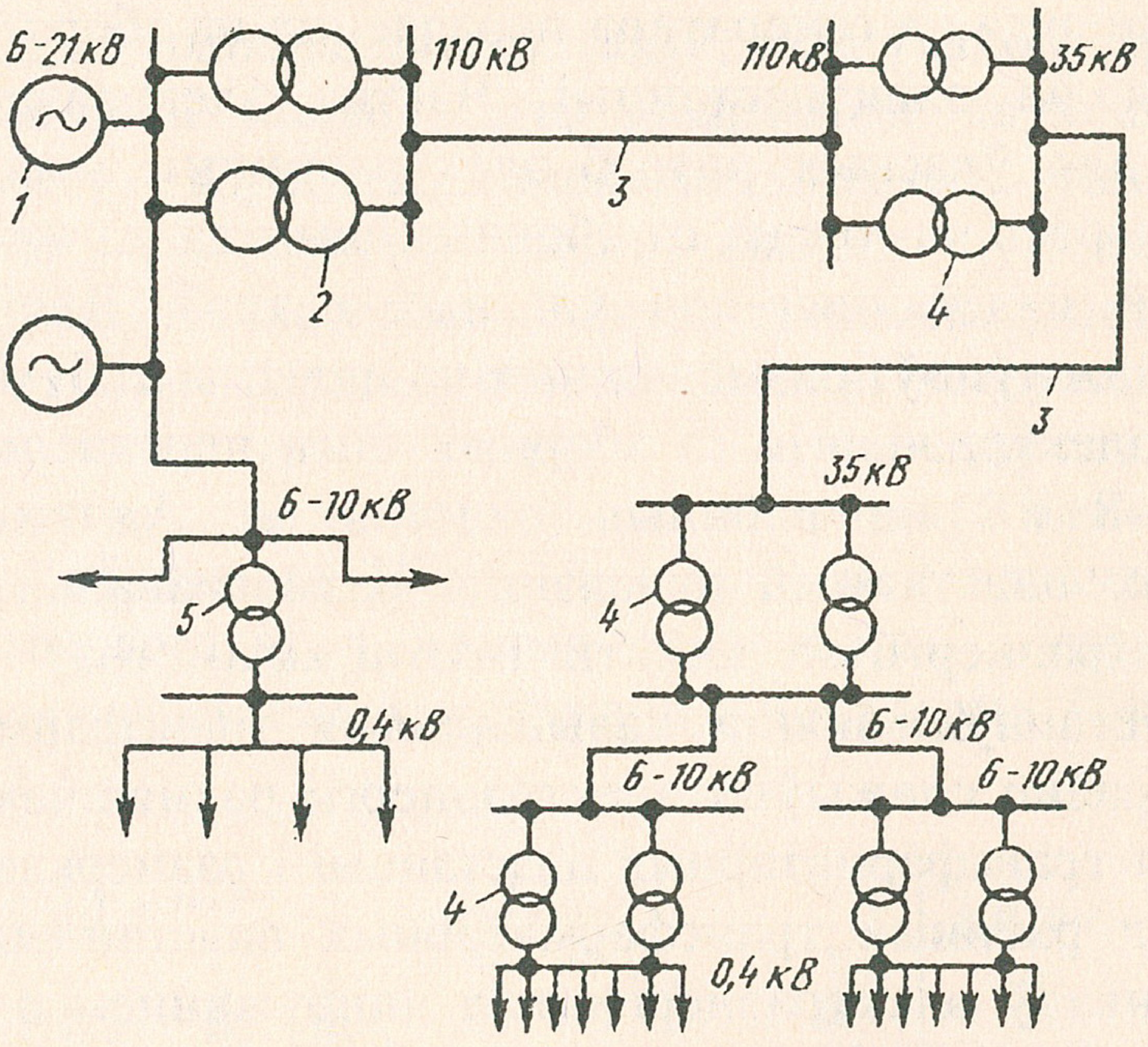
Перадача электраэнергіі пастаянным токам амаль не патрабуе перагляду асноўнага абсталявання дзейных электрастанцый і трансфарматарных падстанцый. Пры перадачы электраэнергіі пастаянным токам знікае неабходнасць у сінхранізацыі работы электрастанцый. Сістэма электраперадачы працуе ўстойліва, змяншаюцца страты ў ЛЭП, адсутнічае паверхневы эфект у правадах.

Да недахопаў перадачы электраэнергіі пастаянным токам належыць аднесці: немагчымасць адгалінавання ад лініі электраперадачы ў прамежкавых пунктах і складанасць тэхнічнага выканання інвертарных установак для пераўтварэння пастаяннага

току ў пераменны. Эканамічна выгадна і тэхнічна сябе апраўдвае перадача электраэнергіі пастаянным токам толькі вялікіх магутнасцей і на вялікія адлегласці.

У СНД створана першая ў свеце электраперадача пастаянным токам на адлегласць 473 км: Волжская ГЭС — Данбас магутнасцю 750 МВт пры напружанні 800 кВ. Цяпер дзейнічае лінія электраперадачы пастаянным токам Экібастуз — Цэнтр працягласцю 2500 км пры напружанні 1,5 МВ.

В ы с а к а в о л ь т н ы я л і н і і электраперадачы пераменнага току (рыс. 10.5) складаюцца з генератараў *1*, якія даюць пераменны ток напружаннем 6—10, 6—21 кВ, звяна трансфарматарных падстанцый *2*, якія павышаюць напружанне да 35, 110, 220, 330, 500, 750 і 1150 кВ, паветраных ліній электраперадачы і ізаляцыйных апор *3*, звяна паніжальных трансфарматарных падстанцый *4*, якія пераўтвараюць пераменны ток высокага напружання ў пераменны ток нізкага напружання, трансфарматара ўласных патрэб *5*.



Рыс. 10.5. Схема высакавольтнай лініі электраперадачы

У сельскіх мясцовасцях, размешчаных далёка ад высакавольтных ліній электраперадачы, будуюцца раённыя электрастанцыі, якія забяспечваюць энергіяй невялікі раённы цэнтр або некалькі калгасаў. Генератары такой электрастанцыі даюць ток нізкага напружання (380—220 В), які непасрэдна са зборных шын перадаецца мясцовым спажыўцам.

Для абслугоўвання аддаленых калгасаў пры электрастанцыі ўстанаўліваецца павышальная трансфарматарная падстанцыя, якая пераўтварае пераменны ток напружаннем 380—220 В у пераменны ток 6—10 кВ. На месцы спажыўца электраэнергіі будуецца калгасная паніжальная падстанцыя, якая пераўтварае пераменны ток высокага напружання ў пераменны ток нізкага напружання (380—220 В). З другасных абмотак паніжальнага трансфарматара электраэнергія перадаецца на галоўны шчыт, а адтуль — на асобныя аб'екты (лесапілку, млын, жывёлагадоўчую ферму, малацільны ток).

Токаправод у высакавольтных лініях падвешваецца да гірляндаў ізалятараў, якія забяспечваюць надзейнасць ізаляцыі. Для аховы токавядучых правадоў ад навальнічных разрадаў паміж вяршынямі апор нацягваецца заземлены жалезны трос. Нізкавольтныя лініі электраперадачы ўстанаўліваюцца на драўляных апорах з апорнымі ізалятарамі. Адлегласць паміж апорамі нізкавольтнай лініі павінна быць 30—50 м, высакавольтнай лініі 6—10 кВ — 50—100 м, 220 кВ — 250—350 м, 500 кВ — 350—450 м.

Электраэнергія ад генератара перадаецца на зборныя шыны, якія ўстаноўлены на электрастанцыі. Частка электраэнергіі выкарыстоўваецца для ўласных патрэб электрастанцыі, для чаго робіцца кабельны адвод непасрэдна са зборных шын да паніжальнай трансфарматарнай падстанцыі для ўласных патрэб. Для забеспячэння мясцовых спажыўцоў, размешчаных на адлегласці 5—8 км ад электрастанцыі, электраэнергія са зборных шын перадаецца пад напружаннем 6—8 кВ на раённыя падстанцыі. Ад раённых трансфарматарных падстанцый адводзіцца размеркавальная сетка. Для падачы электраэнергіі на дзесяткі і сотні кіламетраў паблізу электрастанцыі ўстанаўліваюцца павышальныя трансфарматарныя падстанцыі. У раёне спажыўца электраэнергіі размяшчаюцца раённыя паніжальныя трансфарматарныя падстанцыі і размеркавальныя пункты (РП). Ад раённых трансфарматарных падстанцый і размеркавальных пунктаў электраэнергія пад напружаннем 6—10 кВ перадаецца на калгасныя і цэхавыя падстанцыі, якія зніжаюць напружанне да рабочага 380—220 В.

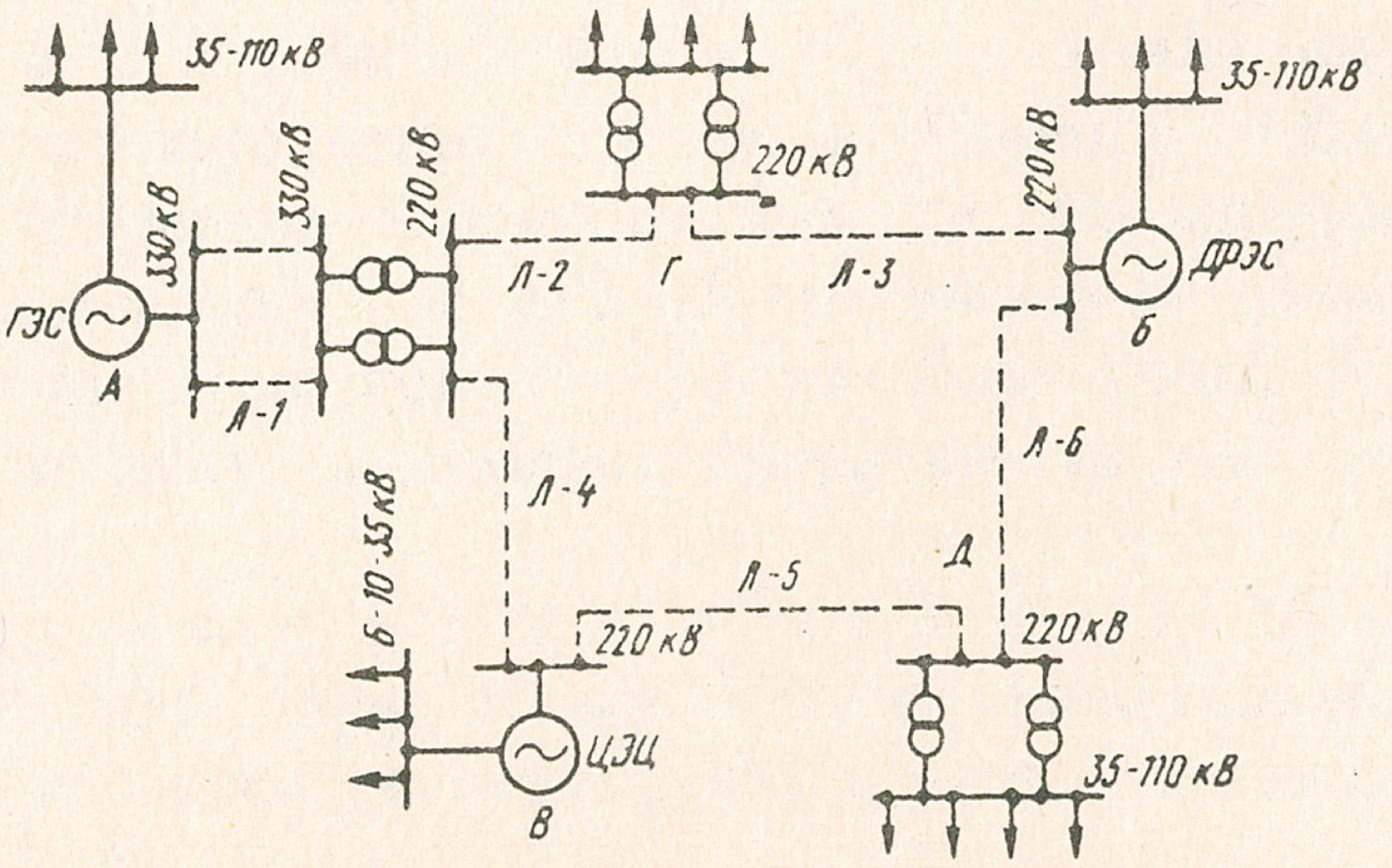
Лініі электраперадачы падзяляюцца на сілкавальныя і размеркавальныя сеткі. Па *сілкавальных сетках* электраэнергія перадаецца ад электрастанцыі на раённыя падстанцыі і сілкавальныя пункты. Да сілкавальных сетак спажыўцы не падключаюцца. *Размеркавальная сетка* ўключае раённыя падстанцыі, якія зніжаюць пераменны ток да рабочага напружання, і сілкавальныя пункты. Па размеркавальных сетках электраэнергія размяркоўваецца паміж спажыўцамі. Галоўнай за-

дачай размеркавальнай сеткі з'яўляецца бесперапыннасць электразабеспячэння спажыўцоў. Для забеспячэння электраэнергіяй адказных спажыўцоў, для якіх перапынак у забеспячэнні электраэнергіяй звязаны з сапсаваннем прадукцыі і абсталявання, устанаўліваецца рэзервовая лінія або спажыўцы забяспечваюцца двухбаковым незалежным жыўленнем.

Спажыванне электраэнергіі змяняецца ў залежнасці ад пары года і часу сутак. Раніцай і вечарам павелічэнне спажывання электраэнергіі адбываецца за кошт падключэння асвятляльнай сеткі і бытавой нагрузкі.

Нераўнамернасць спажывання электраэнергіі вядзе да непастаяннай нагрузкі электрастанцыі, што шкодна адбіваецца на абсталяванні і змяншае ККД. Для раўнамернай нагрузкі і надзейнага забеспячэння спажыўцоў электраэнергіяй генератары суседніх электрастанцый падключаюцца на паралельную работу, гэта значыць электрастанцыі злучаюцца высакавольтнай лініяй у адзіную сістэму.

Схема энергетычнай сістэмы дадзена на рыс. 10.6. Высакавольтныя лініі электраперадачы станцый, якія ўваходзяць у сістэму, утвараюць замкнёнае кольца, што забяспечвае двухбаковае жыўленне спажыўцоў. Кіраванне электрастанцыямі, уключанымі ў сістэму, вядзецца з адзінага дыспетчарскага пункта. Пры павелічэнні нагрузкі на асобных электрастанцыях дадаткова падключаюцца электрагенератары, пры змяншэнні нагрузкі рэзервовыя генератары выключаюцца. Электрастанцыі, якія заўсёды працуюць з пастаяннай нагрузкай, называюцца *базіснымі.* Базіснымі электрастанцыямі з'яўляюцца ЦЭЦ, паколькі яны адначасова забяспечваюць прамысловасць і жылыя дамы парай і гарачай вадой. Да базісных электрастанцый належаць і некаторыя ГЭС з вялікім



Рыс. 10.6. Схема энергетычнай сістэмы

расходам вады, якія не маюць вадасховішч, а таксама ДРЭС, якія працуюць на мясцовым паліве.

Электрастанцыі, якія падключаюцца на час павелічэння спажываемай магутнасці і ў момант максімальнага спажывання электраэнергіі, называюцца *паўпікавымі* і *пікавымі.* Да ліку пікавых і паўпікавых электрастанцый належаць ГЭС з вадасховішчам, а таксама раённыя цеплавыя электрастанцыі невялікай магутнасці.

ПЫТАННІ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. З якіх асноўных звенняў складаюцца лініі электраперадачы?
2. Якія бываюць лініі электраперадачы і дзе яны прымяняюцца?
3. У чым заключаецца перавага перадачы электраэнергіі на вялікія адлегласці пастаянным токам?

11

ЭЛЕМЕНТЫ ТЭХНІКІ БЯСПЕКІ

11.1. Асаблівасці паражэння чалавека электрычным токам

Цела чалавека з'яўляецца праваднікам электрычнага току. Ток выклікае шэраг спецыфічных працэсаў, якія ўласцівыя толькі жывой тканцы і згубна ўплываюць на здароўе.

У залежнасці ад многіх прычын і ўмоў уздзеянне электрычнага току можа быць розным: ад ледзь адчувальнага сударажнага скарачэння мышц пальцаў рук да спынення работы сэрца, да смяротнага паражэння. Бяспека ўздзеяння электрычнага току залежыць ад сілы току, які праходзіць праз арганізм, працягласці яго ўздзеяння, шляху праходжання, роду і частаты току, а таксама ад індывідуальных уласцівасцей і стану чалавечага арганізму. Характар уздзеяння току на чалавека залежыць ад супраціўлення цела чалавека і значэння прыкладзенага да яго напружання. Адрозніваюць тры гранічныя значэнні току (пры яго працяканні па шляху рука—рука): адчувальны, неадпушчальны і фібрылярны.

А д ч у в а л ь н ы   т о к (0,6—1,5 мА) выклікае слабы сверб і лёгкае паколванне. Ён не з'яўляецца небяспечным для жыцця, тым не менш пры працяглым дзеянні адмоўна адбіваецца на здароўі чалавека. Ток у 3—5 мА выклікае раздражэнне ўжо ўсёй кісці рукі. Пры току 8—10 мА боль рэзка ўзмацняецца і ахоплівае ўсю руку, міжвольна скарачаюцца мышцы кісцей рук і перадплеччаў.

Н е а д п у ш ч а л ь н ы   т о к (10—15 мА) выклікае непераносны боль, пры гэтым сутаргі ўзмацняюцца так, што пацярпеўшы не можа разняць руку, у якой знаходзіцца праваднік з токам.

Ток 25—50 мА дзейнічае не толькі на мышцы рук, але і на мышцы тулава і груднoй клеткі. Пры гэтым адбываецца звужэнне

крывяносных сасудаў, павышэнне артэрыяльнага ціску, пацярпеўшы траціць прытомнасць. Працяглае дзеянне такога току можа прывесці да спынення дыхання і нават смерці.

Фібрылярны ток (100 мА і больш) пранікае глыбока ў грудзі і раздражняе мышцу сэрца. Такі ток вельмі небяспечны: праз 1—2 с пасля пачатку яго дзеяння пачынаюцца частыя скарачэнні валокнаў мышцы (фібрыл), спыняецца рух крыві ў сасудах, наступае смерць.

Ток большы за 5 А (як пераменны, так і пастаянны), прыводзіць да імгненнага спынення сэрца, мінуючы стан фібрыляцыі.

Да гэтага часу размова ішла аб пераменным току прамысловай частаты 50 Гц. Пры павышэнні частаты (пачынаючы з 1000—3000 Гц) бяспека паражэння электрычным токам прыкметна зніжаецца і пры частотах 450—500 кГц поўнасцю знікае (акрамя апёку). Гэта тлумачыцца паверхневым эфектам: ток высокай частаты праходзіць па неадчувальнай паверхні скуры.

Пастаянны ток прыблізна ў 4—5 разоў больш бяспечны, чым пераменны, пры напружаннях 250—300 В. Пры больш высокіх напружаннях пастаянны ток аказваецца больш небяспечны, чым пераменны.

Электрычнае супраціўленне цела чалавека залежыць галоўным чынам ад стану паверхневага слоя скуры і можа быць вельмі розным: ад 1000 да 100 000 Ом і больш. Тканка цела мае малое супраціўленне (300—500 Ом). На супраціўленне скуры чалавека моцны ўплыў аказвае яе стан: наяўнасць драпін, трэшчын, ранак. Увільгатненне скуры вадой або потам, забруджванне яе (асабліва металічным або вугальным пылам) дужа зніжае супраціўленне. Малое супраціўленне маюць участкі скуры твару, шыі, рук вышэй локця, тыльныя бакі кісцей рук, падпахавыя ўпадзіны. Супраціўленне скуры далоней і падэшваў з-за яе загрубеласці значна вышэйшае.

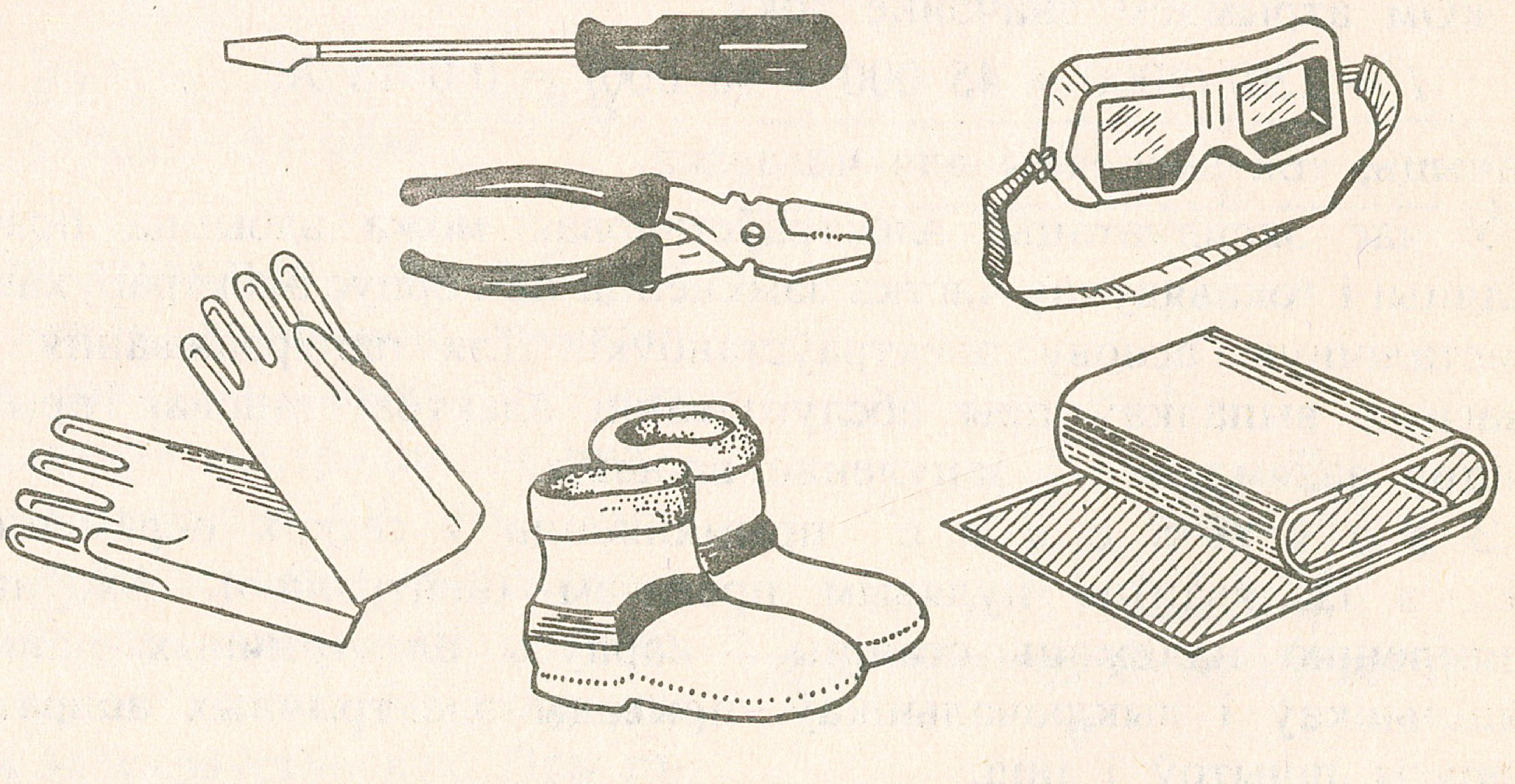
11.2. Меры засцярогі ад паражэння электрычным токам

Для папярэджвання паражэння токам людзей, якія абслугоўваюць электрычныя ўстаноўкі, токавядучыя часткі ўстановак ізалююць, корпусы зазямляюць, а часткі, якія верцяцца, агароджваюць. Ток да электрапрывада падводзіцца ізаляваным провадам

у стальных трубах, а таксама браніраваным кабелем. Праходы ў сценах, перакрыццях і столях ізалююцца эбанітавымі, фарфоравымі або гумавымі ўтулкамі. Клемы на шчытках электраўстановак з пускарэгулюемымі апаратамі мацуюцца на эбанітавых і мармуровых асновах. У якасці ізаляцыйных матэрыялаў пры мантажы электраўстановак выкарыстоўваюцца эбаніт, фарфор, гума, мармур, міканіт, бакеліт і інш.

Пасля мантажу электраўстаноўкі правяраюць стан ізаляцыі, вымяраюць яе супраціўленне. Стан ізаляцыі лічыцца здавальняючым, калі супраціўленне паміж токавядучай часткай і зямлёй не менш чым 500 кОм. Праверцы ізаляцыі падлягаюць таксама працуючыя электраўстаноўкі: у памяшканні без павышанай небяспекі — адзін раз у два гады, а ў сырых памяшканнях і ў памяшканнях з едкімі парамі — не радзей аднаго раза ў год.

Для засцярогі персаналу ад паражэння электрычным токам прымяняюцца засцерагальныя сродкі: дыэлектрычныя пальчаткі, слясарна-мантажны інструмент з ізаляванымі ручкамі, дыэлектрычныя боты і дываны, засцерагальныя акуляры і інш. (рыс. 11.1).



Рыс. 11.1. Сродкі індывідуальнай электразасцярогі

Паражэнне электрычным токам адбываецца пры замыканні электрычнага ланцуга праз цела чалавека. Найбольш частыя выпадкі паражэння токам тады, калі чалавек дакранецца да двух або аднаго проваду і мае пры гэтым кантакты з зямлёй. У першым выпадку дакрананне называюць *двухфазным*, у другім — *аднафазным*.

Пры двухфазным дакрананні чалавек трапляе пад лінейнае напружанне, таму праз яго працякае вялікі ток:

$$I = U_{л} / r_{ч} = 380/2000 = 0,19 \text{ A},$$

дзе $U_л$ — лінейнае напружанне і $r_ч$ — сярэдняе (пры добрых кантактах) супраціўленне цела чалавека.

Ток у гэтым выпадку з'яўляецца смяротна небяспечным, хаця чалавек можа быць добра ізаляваны ад зямлі.

У выніку аднафазнага дакранання ў сетцы з заземленым нулявым провадам утвараецца паслядоўны ланцуг з супраціўлення цела чалавека, абутку, падлогі і заземленай нейтралі (нулявога праваду) крыніцы току. Да гэтага ланцуга прыкладзена фазнае напружанне. Але калі чалавек у мокрым або падбітым жалезнымі цвікамі абутку стаіць на сырой зямлі або на праводзячай падлозе, то гэтыя апошнія супраціўленні малыя ў параўнанні з супраціўленнем цела чалавека. У гэтым ланцугу пройдзе ток

$$I = U_ф / r_ч = 220/2000 = 0{,}11 \text{ A}.$$

Такі ток смяротна небяспечны.

Калі ж чалавек абуты ў спецыяльны гумавы абутак і знаходзіцца на сухой падлозе, то пры супраціўленні абутку 45 кОм і падлогі 98 кОм атрымаем значэнне току

$$I = 220/(2000 + 45\,000 + 98\,000) = 0{,}0015 \text{ A},$$

значыць, ток бяспечны для чалавека.

У час эксплуатацыі электраўстановак можа адбыцца прабой ізаляцыі і токавядучая частка замкнецца на корпус электрарухавіка і металічную аснову электраўстаноўкі. Для папярэджвання няшчасных выпадкаў пры абслугоўванні электраўстановак прымяняецца заземленне і зануленне апошніх.

З а з я м л е н н е прымяняецца ў сетках пераменнага току з ізаляваным нулявым провадам (нейтраллю). Ахоўнаму зазямленню належаць станіны і карпусы электрычных машын, свяцільнікаў і выключальнікаў, прывады электрычных апаратаў, карпусы шчытоў і інш.

У электраўстаноўцы без зазямлення замыканне адной фазы сеткі на корпус электрарухавіка стварае вялікае напружанне паміж корпусам электрарухавіка і зямлёй. Чалавек, які стаіць на зямлі, пры дакрананні да корпуса электрарухавіка трапляе пад напружанне, небяспечнае для жыцця. Калі ў гэтым выпадку другая фаза сеткі мае прабой ізаляцыі і замыкаецца на зямлю, то чалавек, які стаіць на зямлі і дакрануўся да корпуса электрарухавіка, трапляе пад лінейнае напружанне сеткі. Калі нават ізаляцыя іншых фаз здавальняючая, замыканне адной фазы на корпус электрарухавіка небяспечна для абслуговага персаналу. У гэтым выпадку пад лінейным напружаннем апынецца чалавек, які дакрануўся да корпуса электрарухавіка, і ізаляцыя ўсіх па-

ралельна падключаных прымальнікаў другой фазы. Ток замыкання вызначаецца па формуле

$$I_з = U_л / (r_ч + r_{пр}).$$

Пры $U_л$ = 380 В, $r_ч$ = 2000 Ом і $r_{пр} = (5 \cdot 10^5)/250 = 2000$ Ом ($5 \cdot 10^5$ Ом — нармальнае супраціўленне ізаляцыі, 250 — лік паралельна падключаных прымальнікаў) атрымаем ток замыкання

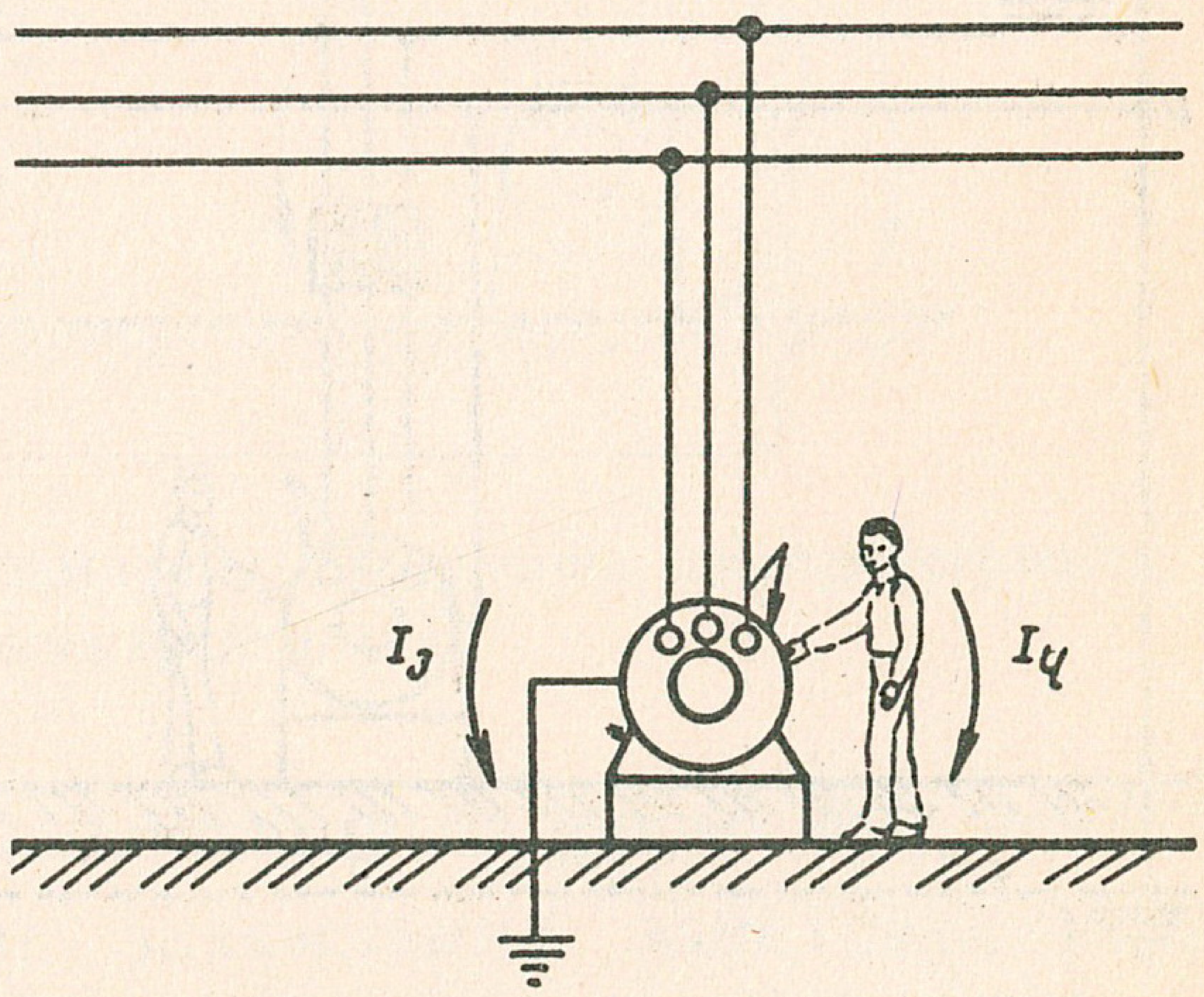
$$I_з = 380/(2000 + 2000) = 0{,}095 \text{ А},$$

які з'яўляецца смяротна небяспечным для чалавека.

Пры замыканні фазы на корпус заземленага электрарухавіка цела чалавека шунціруецца зазямляльнікам (4—10 Ом) (рыс. 11.2). У гэтым выпадку чалавек, які стаіць на зямлі, можа бяспечна дакрануцца да корпуса электрарухавіка і металічнай асновы электраўстаноўкі. Напружанне замыкання, пад якім будзе знаходзіцца чалавек,

$$U_з = \frac{U_л\, r_з}{r_з + r_{пр}} = \frac{380 \cdot 4}{4 + 2000} = 0{,}8 \text{ В}.$$

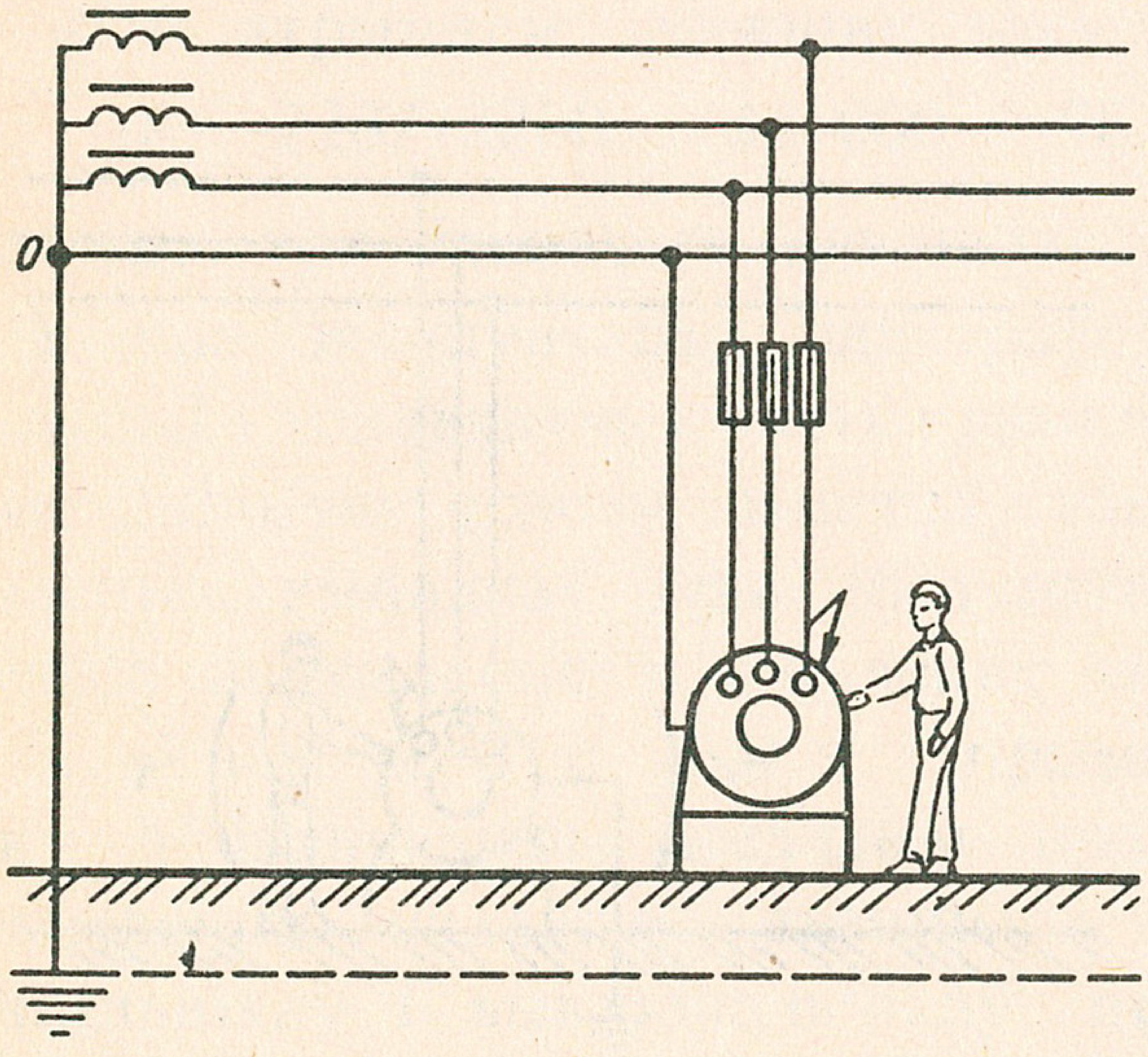
Пры захаванні норм рабочага зазямлення аднафазнае замыканне на корпус рухавіка ў сетках з ізаляванай нейтраллю не прадстаўляе небяспекі. У гэтых умовах небяспечным з'яўляецца адначасовае замыканне дзвюх фаз адной сеткі на карпусы дзвюх электраўстановак. Пры гэтым лінейнае напружанне сеткі размяркоўваецца прапарцыянальна супраціўленням рабочых зазямленняў абедзвюх электраўстановак.



Рыс. 11.2. Схема электрабяспечнасці пры зазямленні электраўстаноўкі

Пры $U_л$ = 380 В, $r_{з1}$ = 4 Ом і $r_{з2}$ = 6 Ом ток замыкання $I_з = \frac{U_л}{r_{з1} + r_{з2}} = \frac{380}{4 + 6} = 38\, A$, а напружанні замыкання на электраўстаноўках складуць: на першай $U_{з1} = 38 \cdot 4 = 152\, В$, а на другой $U_{з2} = 38 \cdot 6 = 228\, В$. Гэта напружанне з'яўляецца небяспечным для абслуговага персаналу.

У чатырохправоднай сетцы пераменнага току нейтраль (нулявы провад) зазямляецца, а карпусы электраўстановак падключаюцца да нейтралі, гэта значыць выконваецца так званае з а н у л е н н е электраўстановак. Падключэнне карпусоў электрарухавікоў і іншага абсталявання да заземленай нейтралі трансфарматара забяспечвае аўтаматычнае адключэнне аварыйнага ўчастка ланцуга пры замыканні фазы на корпус машыны, паколькі ток кароткага замыкання фазы павінен быць па меншай меры ў тры разы большы за ток плаўкай устаноўкі бліжэйшага засцерагальніка і ў паўтара раза большы за максімальны ток бліжэйшага аўтамата. Калі ток кароткага замыкання будзе недастатковым для адключэння электраўстановак, то корпус машыны апынецца пад небяспечным напружаннем. Сапраўды, няхай супраціўленне нулявога праваду большае за супраціўленне фазнага праваду, тады фазнае напружанне сеткі размяркуецца прапарцыянальна супраціўленням фазнага і нулявога правадоў. Калі чалавек дакранаецца да корпуса электрарухавіка, то ён трапляе пад напружанне, якое прыпадае на нулявы провад (рыс. 11.3).



Рыс. 11.3. Схема занулення электраўстаноўкі

Асабліва небяспечным для жыцця чалавека з'яўляецца дакрананне да корпуса электрарухавіка пры абрыве нулявога праваду і замыканні фазы на корпус электрарухавіка. У гэтым выпадку чалавек трапляе пад фазнае напружанне сеткі.

Для зніжэння напружання дакранання пры замыканні фазы на корпус рухавіка прымяняецца адначасовае зазямленне нейтралі і электраўстаноўкі (паўторнае зазямленне). Пры гэтым фазнае напружанне размяркоўваецца прапарцыянальна супраціўленням зазямлення нейтралі і зазямлення электраўстаноўкі:

$$U_{з1} = \frac{U_ф r_{з1}}{r_{з1} + r_{з2}} = \frac{220 \cdot 4}{4 + 4} = 110 \text{ В};$$

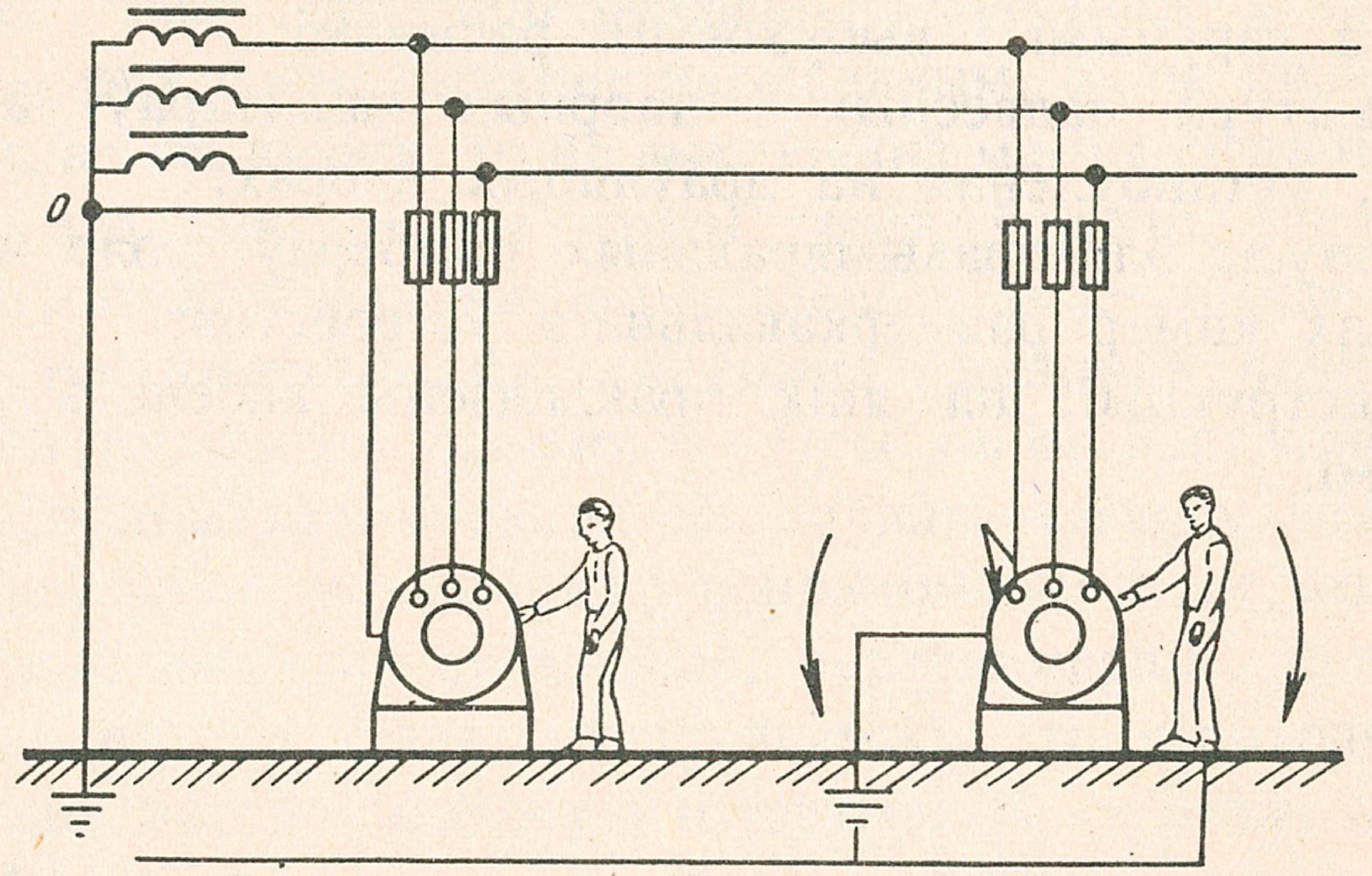
і

$$U_{з2} = \frac{U_ф r_{з2}}{r_{з1} + r_{з2}} = \frac{220 \cdot 4}{4 + 4} = 110 \text{ В},$$

дзе $r_{з1}$ — супраціўленне зазямлення нейтралі; $r_{з2}$ — супраціўленне зазямлення электраўстаноўкі.

Такім чынам, чалавек, які дакранаецца да корпуса электрарухавіка, трапляе пад напружанне, меншае за фазнае, але небяспечнае для абслуговага персаналу.

Зануленне адных электраўстановак і зазямленне другіх у адной электрасетцы забараняецца. Пры зазямленні адной электраўстаноўкі і зануленні іншых замыканне фазы на корпус заземленай электраўстаноўкі стварае на ёй і на ўсім занулёным абсталяванні небяспечныя напружанні (рыс. 11.4).



Рыс. 11.4. Схема адначасовага зазямлення і зanулення электраўстаноўкі ў адным электраланцугу

Сапраўды, ток замыкання вызначаецца па формуле $I_з = U_ф/(r_з + r_0)$, дзе $r_з$ — супраціўленне зазямлення электраўстаноўкі; r_0 — супраціўленне зазямлення занулёнай сістэмы.

Напружанне дакранання да корпуса заземленай установкі $U_з = \frac{U_ф r_з}{r_з + r_0}$, а занулёнага абсталявання $U_0 = \frac{U_ф r_0}{r_з + r_0}$. Пры $U_ф$ = = 220 В, $r_з$ = 6 Ом і r_0 = 4 Ом атрымаем $U_з = \frac{220 \cdot 6}{6 + 4} = 132$ В і $U_0 = \frac{220 \cdot 4}{6 + 4} =$ 88 В — напружанні, небяспечныя для абслуговага персаналу.

Супраціўленне зазямлення нейтралі генератара і трансфарматараў не павінна перавышаць 4 Ом, а пры магутнасці менш за 100 кВ · А — не больш за 10 Ом. Пры гэтым паўторнае

зазямленне можа мець супраціўленне да 30 Ом, калі лік зазямленняў роўны тром і больш.

Засцерагальнаму зазямленню належаць карпусы і станіны электрычных машын, стрыжні трансфарматараў, карпусы і прывады электрычных апаратаў кіравання, каркасы шчытоў, металічныя канструкцыі электраўстановак, карпусы кабельных муфт, металічныя абалонкі і стальныя трубы кабеляў і правадоў, металічныя апараты і г. д.

У зазямленні не маюць патрэбы:

1) электраўстаноўкі ў ацяпляльных памяшканнях без павышанай небяспекі з драўлянай падлогай пры намінальным напружанні 380 В і ніжэй;

2) пры намінальным напружанні 127 В пераменнага току і 110 В і ніжэй пастаяннага току ва ўсіх памяшканнях, акрамя сырых і з гаручымі і выбуховымі рэчывамі;

3) арматура падвесных і апорных ізалятараў, асвятляльная арматура, устаноўленая на драўляных апорах;

4) карпусы электравымяральных прыбораў, рэле на шчытах і на сценках камер размеркавальнага ўстройства;

5) канструкцыі, па якіх пракладзены кабелі з заземленымі абалонкамі.

11.3. Аказанне першай дапамогі пры паражэнні электрычным токам

Калі чалавек трапіў пад напружанне электрычнага току, то неабходна неадкладна вызваліць пацярпеўшага ад дзеяння электрычнага току — адключыць участак электрычнай сеткі, да якога ён дакранаецца: выключыць рубільнік, выключальнік, выкруціць пробку. Калі гэта немагчыма зрабіць, то неабходна адцягнуць пацярпеўшага ад электрычнага ланцуга. Для гэтага трэба надзець гумавую пальчатку або абкруціць руку шарсцяным шалікам, хусткай або ўзяцца за палу пінжака, курткі і адцягнуць пацярпеўшага.

Калі стаяць на сухой драўлянай падлозе ў чаравіках з гумавай падэшвай, пры сухім адзенні пацярпеўшага яго можна адцягваць ад электрычнага праваду голымі рукамі. Пры наяўнасці цэментнай або вільготнай падлогі неабходна пакласці на падлогу драўляны,

фанерны насціл, драўляную дошку або пліту ДВП, ДСП, стаць на яе і адцягнуць пацярпеўшага. Пры наяўнасці вяроўкі, ізалявана-га кабелю або проваду можна накінуць іх на пацярпеўшага і адцягнуць ад токавядучага проваду. Затым трэба тэрмінова выклікаць доктара, а самому пакласці пацярпеўшага на спіну, расшпіліць каўнер, пояс, стварыць прыток свежага паветра і хутка вызначыць ступень паражэння. Ніколі нельга лічыць пацярпеўшага мёртвым пры спыненні дыхання, сэрцабіцця, пульсу. Пры паражэнні электрычным токам смерць часта бывае ўяўнай, і толькі доктар можа зрабіць заключэнне аб смерці пацярпеўшага.

У залежнасці ад стану пацярпеўшага прыступаюць да аказання першай дапамогі. Калі пасля вызвалення пацярпеўшага ад дзеяння электрычнага току яго прытомнасць становіцца яснай, колер скуры, губ — ружовым, дыханне нармальным, пульс прамацваецца добра, зрэнкі вачэй вузкія, то не выключана магчымасць наступнага пагаршэння яго стану. Пры гэтым трэба ўкласці пацярпеўшага ў зручнае становішча, расшпіліць адзенне, якое сціскае дыханне, пасцяліць мяккую падсцілку і накрыць, стварыць поўны спакой і назіраць за пульсам і дыханнем. Пры такім паражэнні пацярпеўшаму забараняецца рухацца да поўнага выздараўлення.

Калі пацярпеўшы знаходзіцца ў непрытомным стане, колер скуры і губ сінюшны, дыханне сутаргавае, нераўнамернае, пульс прашчупваецца дрэнна, а зрэнкі вачэй шырокія, то неабходна адразу даць панюхаць ватку, змочаную нашатырным спіртам, апырскаць твар халоднай вадой і да прыходу доктара прыступіць да выканання штучнага дыхання па прынцыпе «з рота ў рот» або «з рота ў нос». Калі ў паражонага адсутнічае прытомнасць, колер скуры, губ бледны, дыханне і пульс адсутнічаюць, а зрэнкі вачэй шырокія, то гэта азначае, што ён знаходзіцца ў стане клінічнай смерці. У гэтым выпадку неабходна прыступіць да выканання штучнага дыхання і знешняга масажу сэрца. Для правядзення штучнага дыхання спосабам «з рота ў рот» пацярпеўшага належыць палажыць на спіну на што-небудзь цвёрдае (падлогу, стол), расшпіліць адзенне (пінжак, кашулю), забяспечыць прыток свежага паветра, вызваліць верхнія дыхальныя шляхі, якія пры непрытомным стане заўсёды закрыты запаўшым языком. Для гэтага належыць закінуць галаву пацярпеўшага назад, адну руку пакласці пад патыліцу, а другой націснуць на лоб, пры гэтым звычайна адкрываецца рот. Калі рот не адкрываецца, то трэба чатырма пальцамі абедзвюх рук узяць за ніжнюю сківіцу і выцягнуць яе трохі наперад, так, каб ніжнія зубы сталі наперадзе верхніх. Калі такім чынам раскрыць рот не ўдаецца, то трэба ў вуглы рота паміж карэннымі зубамі акуратна ўставіць

дошчачку або ручку ад лыжкі і расшчапіць зубы; абгарнуць бінтам або хусткай палец і ачысціць рот ад слізі; прыступіць да выканання штучнага дыхання. Той, хто аказвае дапамогу, размяшчаецца збоку ад галавы пацярпеўшага, робіць глыбокі ўдых, шчыльна абхоплівае губамі адкрыты рот пацярпеўшага і з сілай выдыхае паветра, адначасова рукой заціскаючы яму нос. Удыхаць паветра можна праз марлю або насавую хустачку.

Пры ўздыманні грудной клеткі пацярпеўшага ўдзіманне паветра спыняецца. Потым адбываецца выдых і грудная клетка апускаецца. Калі адкрыць рот пацярпеўшага немагчыма, тады робіцца штучнае дыханне па спосабу «з рота ў нос». Пры гэтым паветра ўдзімаецца ў нос, а рот пацярпеўшага шчыльна закрываецца. Удзіманне паветра належыць праводзіць з інтэрвалам 5—6 с. Дзецям удзіманне паветра робіцца часцей і ў меншым аб'ёме. Штучнае дыханне спыняецца пасля аднаўлення ў пацярпеўшага глыбокага і рытмічнага самастойнага дыхання. Пры адсутнасці ў пацярпеўшага пульсу робяць запар два ўдзіманні і выконваюць знешні масаж сэрца. Знешні масаж сэрца выконваецца як пры поўным спыненні сэрца, так і пры парушэнні рытму яго скарачэнняў. Пры знешнім масажы сэрца пацярпеўшага ўкладваюць на штонебудзь роўнае і цвёрдае: падлогу, стол, лаўку. Затым здымаюць адзенне, агаляюць грудную клетку. Масажыст размяшчаецца збоку ад пацярпеўшага і займае зручнае становішча для нахілу (калі пацярпеўшы знаходзіцца на падлозе, то масажыст становіцца на калені). Пасля двайнога ўдзімання масажыст кладзе далонь адной рукі на ніжнюю палавіну грудзей, а далонь другой — упоперак на першую руку і робіць 15 націсканняў. Націсканні належыць рабіць хуткімі працягласцю 0,5 с з інтэрвалам часу 0,5 с. У час паўзы рук з грудной клеткі пацярпеўшага не здымаюць. Штучнае дыханне і масаж сэрца належыць праводзіць да з'яўлення самастойнага раўнамернага дыхання і рытмічнага пульсу. Дзецям масаж сэрца робіцца адной рукой з частатой 70—100 націсканняў ў хвіліну.

ПЫТАННІ І ЗАДАЧЫ ДЛЯ САМАПРАВЕРКІ

1. Як уздзейнічае электрычны ток на чалавека і ад чаго гэта залежыць?
2. Які электрычны ток з'яўляецца смяротным для чалавека?
3. Ад чаго залежыць супраціўленне цела чалавека?
4. Якія меры бяспекі прымяняюцца пры рабоце электраўстаноўкі?
5. Якія сродкі засцярогі прымяняюцца пры абслугоўванні электраўстановак?
6. Што называецца зазямленнем? Зануленнем? Калі яны прымяняюцца?
7. Ці можна адначасова ў адной электрасетцы выконваць зазямленне і зануленне электраўстройства? Чаму?

8. Для чаго прымяняецца паўторнае зазямленнё?

9. Якое электраабсталяванне не падлягае зазямленню?

10. Пад якім напружаннем апынецца чалавек, які дакранецца да корпуса незаземленага электрарухавіка ў сетцы пераменнага току з ізаляванай нейтраллю пры замыканні фазы на корпус электрарухавіка, калі лінейнае напружанне сеткі 380 В, супраціўленне цела чалавека 2 500 Ом, супраціўленне ізаляцыі фазы 2 000 Ом, супраціўленне зазямлення 6 Ом?

11. У сетцы трохфазнага току з заземленай нейтраллю і паўторным зазямленнем адбылося замыканне фазы на корпус электраўстаноўкі. Ці адбудзецца аўтаматычнае адключэнне электраўстаноўкі, калі лінейнае напружанне сеткі 380 В, супраціўленне зазямлення нейтралі 4 Ом, паўторнага зазямлення 10 Ом, а аўтамат разлічаны на ток 10 А?

12. Як ажыццяўляецца першая дапамога пры паражэнні электрычным токам?

ПРЫКЛАДЫ РАШЭННЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Вызначце амплітуднае напружанне ў сетцы, калі пры супраціўленні рэзістара $r = 40$ Ом амперметр паказвае ток $I = 5{,}5$ А.

Р а ш э н н е. Амплітуднае значэнне напружання пераменнага току звязана з дзейным значэннем формулай $U_m = \sqrt{2}U$, а дзейнае значэнне напружання вызначаецца па паказанні вальтметра ($U = rI$). Такім чынам,

$$U_m = \sqrt{2}rI = 1{,}414 \cdot 40 \cdot 5{,}5 = 311{,}1 \text{ В}.$$

Задача 2. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц паслядоўна ўключаны рэзістар $r = 100$ Ом і катушка індуктыўнасці $L = 200$ мГн.

Вызначце комплекснае супраціўленне і модуль супраціўлення ланцуга, комплексны ток і модуль току, напружанне на рэзістары і катушцы індуктыўнасці, $\cos\varphi$.

Р а ш э н н е. 1. Комплекснае поўнае супраціўленне і модуль супраціўлення ланцуга вызначаюцца паводле формулы $Z = r + jx_L$, дзе $jx_L = j\omega L$. Такім чынам,

$$Z = 100 + j2 \cdot 3{,}1416 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 100 + j62{,}83 \text{ Ом}.$$

Модуль поўнага супраціўлення

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{100^2 + 62{,}83^2} = 118{,}1 \text{ Ом}.$$

2. Комплексны ток вызначаецца паводле закону Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{200(100 - j\,62{,}83)}{100^2 + 62{,}83^2} = 1{,}58 - j\,1 = 1{,}87e^{-j32{,}34^\circ} \text{ А}.$$

Накіруем вектар току па рэчаіснай восі ў дадатным кірунку ($\varphi = 0$), тады комплексны ток

$$\dot{I} = 1{,}87e^{j0^\circ} = 1{,}87 \text{ А}.$$

3. Напружанне на рэзістары

$$\dot{U}_r = r\dot{I} = 100 \cdot 1{,}87 = 187 \text{ В}.$$

4. Напружанне на катушцы індуктыўнасці

$$\dot{U}_L = jx_L\dot{I} = j62{,}83 \cdot 1{,}87 = j117{,}5 \text{ В}.$$

5. Каэфіцыент магутнасці ($\cos\varphi$) вызначаецца з трохвугольніка супраціўленняў:

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{100}{118{,}1} = 0{,}847.$$

Задача 3. У сетцы напружаннем $U = 220$ В і частатой $f = 50$ Гц паслядоўна ўключаны рэзістар супраціўленнем $r = 80$ Ом, катушка індуктыўнасці

L = 446 мГн і кандэнсатар ёмістасцю C = 40 мкФ. Вызначце комплекснае супраціўленне ланцуга і модуль супраціўлення, комплексны ток у ланцугу і модуль току, напружанне на рэзістары, катушцы індуктыўнасці і на кандэнсатары, зрух фаз паміж токам і напружаннем у ланцугу.

Р а ш э н н е. 1. Комплекснае супраціўленне ланцуга ўяўляе сабой суму актыўнага і рэактыўнага супраціўленняў і вызначаецца паводле формулы

$$Z = r + j(x_L - x_c) = r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) .$$

$$Z = 80 + j(2 \cdot 3{,}1416 \cdot 50 \cdot 446 \cdot 10^{-3} - \frac{10^6}{314{,}16 \cdot 40}) =$$

$$= 80 + j(140{,}1 - 79{,}58) = 80 + j60{,}52 \text{ Ом} .$$

Модуль супраціўлення

$$z = \sqrt{80^2 + 60{,}52^2} = 100{,}3 \text{ Ом}; \; Z = 100{,}3e^{j37{,}1^\circ} \text{ Ом} .$$

2. Комплексны ток вызначаецца паводле закону Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{220}{100{,}3e^{j37{,}1^\circ}} = 2{,}19e^{-j37{,}1^\circ} \text{ А}.$$

Модуль току I = 2,19 А. Накіруем вектар току I па рэчаіснай восі ў дадатным кірунку φ = 0, тады комплексны ток $\dot{I} = 2{,}19e^{j0^\circ} = 2{,}19$ А.

3. Напружанне на рэзістары

$$\dot{U}_r = r\dot{I} = 80 \cdot 2{,}19 = 175{,}2 \text{ В} .$$

4. Напружанне на катушцы індуктыўнасці

$$\dot{U}_L = jx_2\dot{I} = j140{,}1 \cdot 2{,}19 = j306{,}8 \text{ В} .$$

5. Напружанне на кандэнсатары

$$\dot{U}_c = -jx_c\dot{I} = -j79{,}58 \cdot 2{,}19 = -j174{,}3 \text{ В} .$$

6. Зрух фаз паміж токам і напружаннем вызначым з формулы

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{80}{100{,}3} = 0{,}7976 , \text{ а } \varphi = 37{,}1^\circ .$$

Задача 4. Ланцуг, які складаецца з трох паслядоўна злучаных прымальнікаў, модулі супраціўлення якіх z_1 = 15 Ом, z_2 = 20 Ом, z_3 = 10 Ом, а $\cos\varphi_1$ = = 0,8 , $\cos\varphi_2$ = 0,6, $\cos\varphi_3 = 0{,}8 (\varphi < 0)$, падключаны да напружання U = 220 В. Вызначыць $\cos\varphi$ ланцуга, комплексны ток і модуль току, напружанне на кожным прымальніку.

Р а ш э н н е. 1. Каэфіцыент магутнасці $\cos\varphi$ ланцуга вызначым з трохвугольніка супраціўленняў: $\cos\varphi = r/z$, дзе $r = r_1 + r_2 + r_3$ — арыфметычная сума, а z — модуль поўнага супраціўлення ланцуга.

$$r = z_1\cos\varphi_1 + z_2\cos\varphi_2 + z_3\cos\varphi_3 = 15 \cdot 0{,}8 + 20 \cdot 0{,}6 + 10 \cdot 0{,}8 = 32 \text{ Ом} .$$

З трохвугольнікаў супраціўленняў маем

$$x_{L1} = \sqrt{z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{15^2 - 12^2} = 9 \text{ Ом},$$

$$x_{L2} = \sqrt{20^2 - 12^2} = 16 \text{ Ом}; \quad x_{c3} = \sqrt{10^2 - 8^2} = 6 \text{ Ом}.$$

Такім чынам,

$$\cos\varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{32}{\sqrt{32^2 + (25 - 6)^2}} = \frac{32}{37{,}22} = 0{,}8598, \text{ а } \varphi = 30{,}7^\circ .$$

2. Комплексны ток вызначым паводле закону Ома:

$$\dot I = \frac{\dot U}{Z} = \frac{220}{37{,}22\, e^{j30{,}7^\circ}} = 5{,}911 e^{-j30{,}7^\circ} = 5{,}083 - j\,3{,}018 \text{ А}.$$

Модуль току $I = 5{,}911$ А.

3. Комплексныя напружанні на прымальніках вызначым паводле формулы $\dot U = Z\dot I$. Выразім комплексныя супраціўленні прымальнікаў у паказальнай форме:

$$Z_1 = z_1 e^{j\varphi_1}, \text{ дзе } \varphi_1 = \arccos\varphi_1 = \arccos 0{,}8 = 36{,}87^\circ; \quad Z_1 = 15 e^{j36{,}87^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_2 = z_2 e^{j\varphi_2}, \text{ дзе } \varphi_2 = \arccos\varphi_2 = \arccos 0{,}6 = 53{,}13^\circ; \quad Z_2 = 20 e^{j53{,}13^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_3 = z_3 e^{-j\varphi_3}, \text{ дзе } \varphi_3 = \arccos\varphi_3 = \arccos 0{,}8 = 36{,}87^\circ; \quad Z_3 = 10 e^{-j36{,}87^\circ} \text{ Ом}.$$

Накіруем вектар току $\dot I$ па рэчаіснай восі ў дадатным кірунку ($\varphi = 0$), тады комплексны ток $\dot I = 5{,}911^{j0^\circ} = 5{,}911$ А.

Напружанні на прымальніках:

$$\dot U_1 = Z_1\dot I = 15 e^{j36{,}87^\circ} \cdot 5{,}911 = 88{,}67 e^{j36{,}87^\circ} = 70{,}94 + j53{,}2 \text{ В};$$

$$\dot U_2 = Z_2\dot I = 20 e^{j53{,}13^\circ} \cdot 5{,}911 = 118{,}2 e^{j53{,}13^\circ} = 70{,}92 + j94{,}56 \text{ В};$$

$$\dot U_3 = Z_3\dot I = 10 e^{-j36{,}87^\circ} \cdot 5{,}911 = 59{,}11 e^{-j36{,}87^\circ} = 47{,}29 - j35{,}47 \text{ В}.$$

Задача 5. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В паслядоўна ўключаны тры прымальнікі, супраціўленні якіх адпаведна роўныя:

$$r_1 = 30 \text{ Ом}; \quad x_{L1} = 100 \text{ Ом}; \quad r_2 = 34 \text{ Ом}; \quad x_{c3} = 52 \text{ Ом}.$$

Вызначце ток у ланцугу і напружанні на кожным прымальніку.

Р а ш э н н е. 1. Вызначым супраціўленне ланцуга:

$$Z = r_1 + r_2 + j(x_{L1} - x_{c3}) = 64 + j(100 - 52) = 64 + j48 = 80 e^{j36{,}87^\circ} \text{ Ом}.$$

2. Вызначым комплексны ток у ланцугу паводле закону Ома:

$$\dot I = \frac{\dot U}{z} = \frac{220}{80 e^{j36{,}87^\circ}} = 2{,}75 e^{-j36{,}87^\circ} \text{ А}.$$

Накіруем вектар току па рэчаіснай восі ў дадатным кірунку ($\varphi = 0$), тады комплексны ток $\dot{I} = 2{,}75^{j0^\circ} = 2{,}75$ А.

3. Напружанне на першым прымальніку

$$\dot{U}_1 = Z_1\dot{I} = (30 + j100)2{,}75 = 82{,}5 + j275 = 287{,}1e^{j73{,}3^\circ} \text{ В.}$$

Модуль напружання $U_1 = 287{,}1$ В.

Напружанне на другім прымальніку

$$U_2 = r_2\dot{I} = 34 \cdot 2{,}75 = 93{,}5 \text{ В.}$$

Напружанне на трэцім прымальніку

$$\dot{U}_3 = -jx_{c3}\dot{I} = -j52 \cdot 2{,}75 = -j143 \text{ В.}$$

Задача 6. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В паслядоўна ўключаны два прымальнікі, супраціўленні якіх роўныя:

$$r_1 = 40 \text{ Ом}; \quad x_{L1} = 48{,}3 \text{ Ом}; \quad x_{c2} = 30 \text{ Ом}.$$

Вызначце комплексны ток і модуль току ў ланцугу, комплекснае напружанне і модуль напружання на кожным прымальніку, поўную, актыўную і рэактыўную магутнасці ланцуга, $\cos\varphi$ ланцуга.

Р а ш э н н е. 1. Запішам супраціўленне ланцуга ў комплексным выглядзе:

$$Z = r + jx_{L1} - jx_{c2} = ze^{j\varphi}.$$

Значыць,

$$Z = 40 + j18{,}3 = 43{,}99e^{j24{,}59^\circ} \text{ Ом}$$

(φ вызначым з формулы $\cos\varphi = \dfrac{40}{43{,}99} = 0{,}91$, а $\varphi = 24{,}59^\circ$).

2. Ток у ланцугу вызначым паводле закону Ома:

$$\dot{I} = \frac{220}{43{,}99e^{j24{,}59^\circ}} = 5e^{-j24{,}59^\circ} = 4{,}547 - j2{,}081 \text{ А}; \; I = 5\text{А}.$$

Накіруем вектар току па рэчаіснай восі ў дадатным кірунку ($\varphi = 0$), тады комплексны ток

$$\dot{I} = 5e^{j0^\circ} = 5 \text{ А.}$$

3. Напружанне на першым прымальніку

$$\dot{U}_1 = Z_1\dot{I} = (40 + j48{,}3) \cdot 5 = 200 + j241{,}5 = 313{,}56e^{j50{,}37^\circ} \text{ В.}$$

Напружанне на другім прымальніку

$$U_2 = -jx_{c2}\dot{I} = -j\,30 \cdot 5 = -j150 \text{ В} = 150e^{-j90^\circ} \text{ В}.$$

4. Комплексная поўная магутнасць ланцуга

$$\tilde{S} = \dot{U}I^* = 220 \cdot 5e^{j24{,}59^\circ} = 1100e^{j24{,}59^\circ} = 1000 + j457{,}8 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Актыўная магутнасць ланцуга $P = 1000$ Вт, рэактыўная $Q = 457{,}8$ ВАр.

5. Каэфіцыент магутнасці

$$\cos\varphi = \frac{1000}{1100} = 0{,}91; \; \cos\varphi = \frac{40}{43{,}99} = 0{,}91.$$

Задача 7. У сетку пераменнага току напружаннем $U = 220$ В паралельна ўключаны рухавік, які мае актыўнае супраціўленне $r = 8$ Ом і індуктыўнае $x_L = 6$ Ом, і кандэнсатар супраціўленнем $x_c = 40$ Ом. Вызначце ток у рухавіку і кандэнсатары, а таксама ў неразгалінаванай частцы ланцуга і зрух фаз паміж токам і напружаннем ў ланцугу.

Р а ш э н н е. 1. Комплексны ток у рухавіку і кандэнсатары вызначаем паводле закону Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{\dot{U}}{r + jx_L} = \frac{220(8 - j6)}{8^2 + 6^2} = 17{,}6 - j13{,}2\text{A}.$$

Модуль току $I_1 = \sqrt{17{,}6^2 + 13{,}2^2} = 22$ А.

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}}{-jx_c} = j\frac{U}{x_c} = j\frac{220}{40} = j\,5{,}5\text{ А}.$$

Модуль току $I_c = 5{,}5$ А.

2. Комплексны ток у неразгалінаваным участку ланцуга роўны суме комплексных токаў галін:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_c = 17{,}6 - j13{,}2 + j5{,}5 = 17{,}6 - j7{,}7\text{ А}.$$

Модуль току $I = \sqrt{17{,}6^2 + 7{,}7^2} = 19{,}21$ А.

3. $\cos\varphi = \dfrac{I_a}{I} = \dfrac{17{,}6}{19{,}21} = 0{,}916$, а $\varphi = \arccos 0{,}916 = 23{,}65°$.

Задача 8. У сетку пераменнага току падключаны паралельна чатыры прымальнікі, якія маюць наступныя супраціўленні: $r_1 = 80$ Ом; $x_{L1} = 60$ Ом; $r_2 = 50$ Ом; $x_{c2} =$ $= 50$ Ом; $r_3 = 100$ Ом; $x_{L4} = 100$ Ом. Вызначце комплексны ток і модуль току ў ланцугу, комплексную і рэактыўную магутнасць усяго ланцуга і кожнага прымальніка.

Р а ш э н н е: 1. Для разліку ланцуга з паралельным злучэннем трох і больш прымальнікаў зручней супраціўленні прымальнікаў выразіць праз праводнасці і вызначыць комплексную праводнасць ланцуга як суму комплексных праводнасцей прымальнікаў: $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4$, дзе

$$Y_1 = g_1 - jb_1 = \frac{r_1}{z_1^2} - j\frac{x_{b1}}{z_1^2} = \frac{80}{80^2 + 60^2} - j\frac{60}{10^4} = 0{,}008 - j0{,}006\text{ См};$$

$$Y_2 = g_2 + jb_2 = \frac{r_2}{z_2^2} + j\frac{x_{c2}}{z_2^2} = \frac{50}{5\,000} + j\frac{50}{5\,000} = 0{,}01 + j\,0{,}01\text{ См};$$

$$Y_3 = g_3 = \frac{1}{r_3} = \frac{1}{100} = 0{,}01\text{ См};\quad Y_4 = -j\frac{1}{x_{L4}} = -j\,0{,}01\text{ См}.$$

Такім чынам,

$Y = 0{,}008 - j0{,}006 + 0{,}01 + j0{,}01 + 0{,}01 - j0{,}01 = 0{,}028 - j0{,}006$ См.

2. Комплексны ток у ланцугу вызначым паводле формулы

$\dot{I} = \dot{U}Y = 220(0{,}028 - j0{,}006) = 6{,}16 - j1{,}32$ А; $I = 6{,}3$ А.

3. Комплексная магутнасць ланцуга

$S = \dot{U}I^* = 220(6{,}16 + j1{,}32) = 1355{,}2 + j290{,}4$ В · А.

Актыўная магутнасць P = 1355,2 Вт, а рэактыўная Q = 240,4 ВАр.

4. Комплексная магутнасць кожнага прымальніка:

$$\widetilde{S}_1 = \dot{U}I_1^* = U^2(-Y_1) = 220^2(0{,}008 + j0{,}006) = 387{,}2 + j290{,}4 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\widetilde{S}_2 = \dot{U}I_2^* = U^2(-Y_2) = 220^2(0{,}01 - j0{,}01) = 484 - j484 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\widetilde{S}_3 = U_{g_3}^2 = 220^2 \cdot 0{,}01 = 484 \text{ Вт};$$

$$S_4 = -U^2 jb_4 = 220^2 \cdot j\,0{,}01 = j\,484 \text{ ВАр}.$$

Рашым гэту задачу, прымяніўшы закон Кірхгофа. Ток у неразгалінаваным участку ланцуга роўны суме токаў галін: $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4$, дзе

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{I_1} = \frac{U}{r_1 + jx_{L1}} = \frac{U(r_1 - jx_{L1})}{r_1^2 + x_{L1}^2} = \frac{220(80 - j60)}{80^2 + 60^2} = 1{,}76 - j1{,}32 \text{ А};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{I_2} = \frac{U}{r_2 - jx_{c2}} = \frac{U(r_2 + jx_{c2})}{r_2^2 + x_{c2}^2} = \frac{220(50 + j50)}{5 \cdot 10^3} = 2{,}2 + j2{,}2 \text{ А};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}}{r_3} = \frac{U}{r_3} = \frac{220}{100} = 2{,}2 \text{ А}; \quad \dot{I}_4 = \frac{\dot{U}}{jx_{L4}} = -j\frac{U}{x_{L4}} = -j\frac{220}{100} = -j2{,}2 \text{ А}.$$

Такім чынам, $\dot{I} = 1{,}76 - j1{,}32 + 2{,}2 + j2{,}2 - j2{,}2 + 2{,}2 = 6{,}16 - j1{,}32$ А.

5. Комплексная магутнасць ланцуга

$$\widetilde{S} = \dot{U}I^* = 220(6{,}16 + j1{,}32) = 1355{,}2 + j290{,}4 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Актыўная магутнасць P = 1355,2 Вт, а рэактыўная Q = 290,4 ВАр.

6. Комплексная магутнасць кожнага прымальніка:

$$\widetilde{S}_1 = \dot{U}I_1^* = 220(1{,}76 + j1{,}32) = 387{,}2 + j290{,}4 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\widetilde{S}_2 = \dot{U}I_2^* = 220(2{,}2 - j2{,}2) = 484 - j484 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\widetilde{S}_3 = \dot{U}I_3^* = 220 \cdot 2{,}2 = 484 \text{ Вт}; \quad \widetilde{S}_4 = \dot{U}I_4^* = 220\,j2{,}2 = j484 \text{ ВАр}.$$

Задача 9. У сетку пераменнага току напружаннем U = 220 В паралельна ўключаны два прымальнікі, комплексныя супраціўленні якіх роўныя: $Z_1 = 40\,e^{j30^\circ}$ Ом; $Z_2 = 100\,e^{-j90^\circ}$ Ом. Вызначце токі ў прымальніках, ток у неразгалінаваным участку ланцуга, магутнасці, якія спажываюцца першым і другім прымальнікамі, $\cos\varphi_1$ і $\cos\varphi_2$.

Р а ш э н н е. 1. Вызначым токі ў прымальніках. Сумясцім вектар напружання з рэчаіснай воссю. Пры гэтым $\varphi = 0$ і комплекснае напружанне

$$\dot{U} = 220e^{j0^\circ} = 220\text{В}.$$

Комплексны ток у першым прымальніку вызначаецца паводле закону Ома:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{220}{40e^{j30^\circ}} = 5{,}5e^{-j30^\circ} = 5{,}5(\cos 30^\circ - j\sin 30^\circ) = 4{,}763 - j2{,}75 \text{ А}.$$

Модуль току ў першым прымальніку

$$I_1 = 5{,}5 \text{ А}.$$

Комплексны ток у другім прымальніку

$$\dot{I}_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{220}{100e^{-j90^\circ}} = 22e^{j90^\circ} = 22(\cos 90^\circ + j\sin 90^\circ) = j2{,}2 \text{ А.}$$

Модуль току

$$I_2 = 2{,}2 \text{ А.}$$

2. Ток у неразгалінаванай частцы ланцуга

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 4{,}763 - j2{,}75 + j2{,}2 = 4{,}763 + j0{,}55 \text{ А.}$$

Модуль току

$$I = \sqrt{4{,}763^2 + 0{,}55^2} = 4{,}8 \text{ А.}$$

3. Комплексная магутнасць першага прымальніка

$$\tilde{S}_1 = \dot{U}I_1^* = 220 \cdot 5{,}5e^{j30^\circ} = 1210e^{j30^\circ} =$$

$$= 1210(\cos 30^\circ + j\sin 30^\circ) = 1047{,}9 + j\,605 \text{ В·А}.$$

Актыўная магутнасць P = 1047,9 Вт, а рэактыўная Q = 605 ВАр. Модуль магутнасці (поўная магутнасць)

$$S = \sqrt{1047{,}9^2 + 605^2} = 1210 \text{ В · А}.$$

Комплексная магутнасць другога прымальніка

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}I_2^* = 220(-j2{,}2) = -j484 \text{ ВАр}.$$

Модуль магутнасці

$$U = 484 \text{ ВАр.}$$

4. $\cos\varphi_1 = \dfrac{4{,}763}{5{,}5} = 0{,}866; \quad \cos\varphi_2 = 0.$

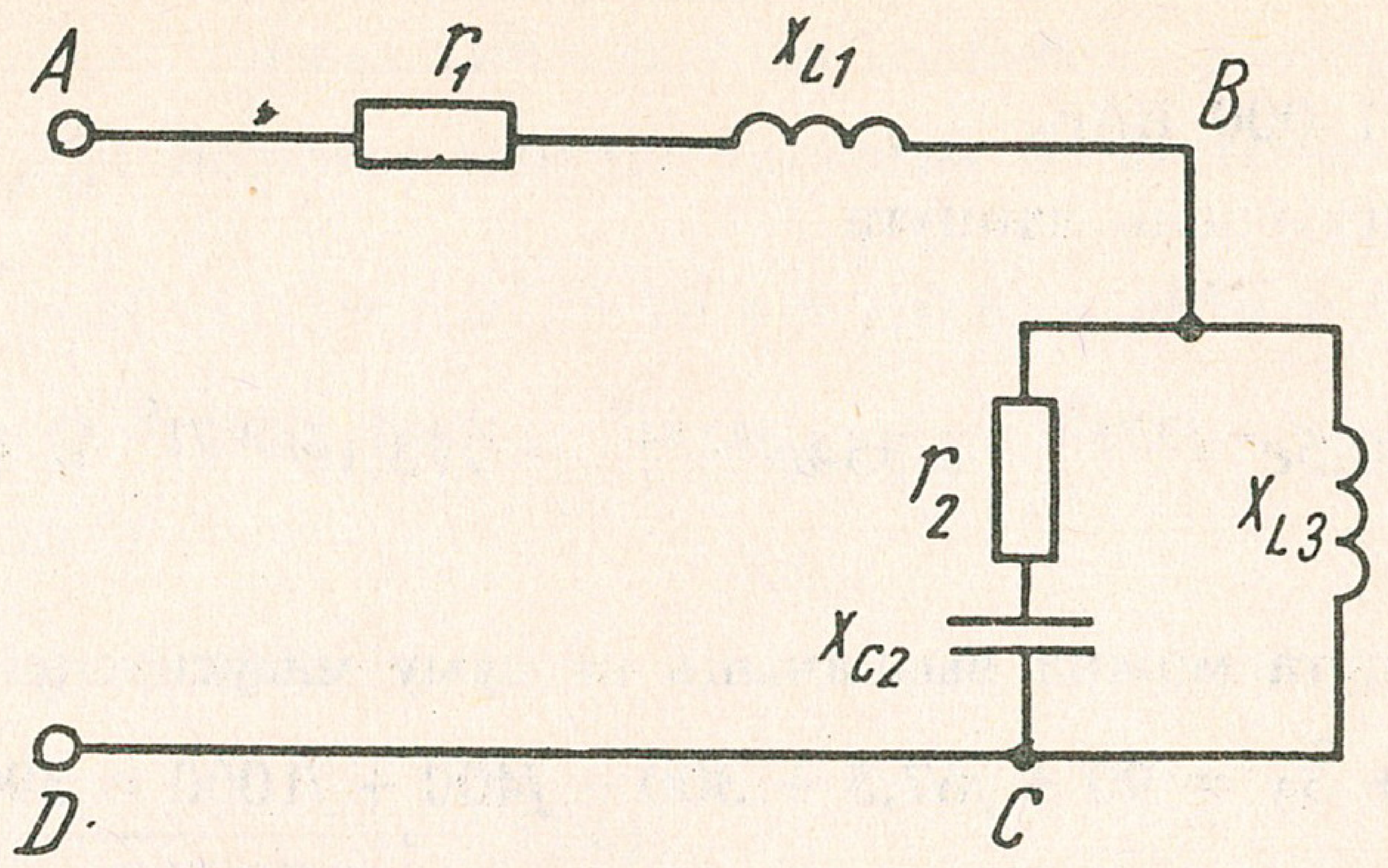
Задача 10. Электрычны ланцуг (рыс. 1) уключаны ў сетку пераменнага току. Вызначце токі ў галінах (I_2 і I_3) і ток у неразгалінаванай частцы ланцуга, напружанне на клемах першага прымальніка U_{AB} і ўсяго ланцуга U, магутнасці S, P і Q кожнага прымальніка і ўсяго ланцуга, cos φ ланцуга, калі r_1 = 8 Ом; x_{L1} = 6 Ом; r_2 = 48 Ом; x_{c2} = 64 Ом; x_{L3} = 40 Ом; U_{BC} = 200 В.

Р а ш э н н е. 1. Запішам супраціўленне прымальнікаў у комплексным выглядзе:

$$Z_1 = 8 + j6 \text{ Ом}; \quad Z_2 = 48 - j64 \text{ Ом}; \quad Z_3 = j40 \text{ Ом}.$$

Сумясцім вектар напружання $\dot{U}_{BC}$ з рэчаіснай воссю, гэта значыць (φ = 0).

$$\dot{U}_{BC} = U_{BC}\, e^{j0^\circ} = U_{BC} = 220 \text{ В.}$$



Рыс. 1. Схема электрычнага ланцуга

Токі ў галінах I_2 і I_3 вызначым паводле закону Ома:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_2} = \frac{200}{48 + j64} = \frac{200}{80\ e^{-j53,13^\circ}} = 2,5\ e^{j53,13^\circ} = 1,5 + j2\ \text{A};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_3} = \frac{200}{j40} = -j\,5\ \text{A} = 5e^{-j90^\circ}\ \ \text{A}.$$

Ток у неразгалінаванай частцы ланцуга

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 1,5 + j2 - j5 = 1,5 - j3 = 3,35e^{-j63,44^\circ}\ \ \text{A}.$$

2. Напружанне

$$\dot{U}_{AB} = Z_1\dot{I} = 10e^{j36,87^\circ}\ \cdot\ 3,35e^{-j63,44^\circ} = 33,5e^{-j26,57^\circ} = 30 - j15\ \ \text{B}\ ;$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} = 30 - j15 + 200 = 230 - j15 = 230e^{-j3,73^\circ}\ \ \text{B}.$$

3. Вызначым магутнасці прымальнікаў і ўсяго ланцуга:

$$\tilde{S}_1 = U_{AB}I^* = 33,5e^{-j26,57^\circ}\ \cdot\ 3,35e^{j63,44^\circ} = 112,2e^{j36,87^\circ} = 90 + j67,5\ \ \text{B}\cdot\text{A},$$

дзе P_1 = 90 Вт; Q_1 = 67,5 ВАр.

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_{BC}I^* = 200\cdot 2,5e^{-j53,13^\circ} = 500e^{-j53,13^\circ} = 300 - j400\ \ \text{B}\cdot\text{A},$$

дзе P_2 = 300 Вт; Q_2 = 400 ВАр.

$$\tilde{S}_3 = \dot{U}_{BC}\overset{*}{I}_3 = 200 \cdot 5e^{j90^\circ} = 200 \cdot j5 = j1000 \text{ В} \cdot \text{А};$$

дзе $P_3 = 0$; $Q_3 = 1\ 000$ ВАр.

Комплексная магутнасць ланцуга

$$\tilde{S} = \dot{U}\overset{*}{I} = 230{,}5e^{-j3{,}73^\circ} \cdot 3{,}354e^{j63{,}44^\circ} - 773{,}1e^{j59{,}71^\circ} = 390 + j\,667{,}6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Магутнасць ланцуга можна вызначыць як суму магутнасцей прымальнікаў:

$$\tilde{S} = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 + \tilde{S}_3 = 90 + j67{,}5 + 300 - j400 + j1000 = 390 + j667{,}5 \text{ В} \cdot \text{А},$$

дзе $P = 390$ Вт; $Q = 667{,}5$ ВАр.

4. $\cos\varphi = \dfrac{390}{773{,}1} = 0{,}504.$

Задача 11. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U = 380$ В падключаны зоркай прымальнік, фазнае супраціўленне якога $Z = 10 + j\,5$ Ом. Вызначце комплексныя значэнні і модулі фазных токаў, комплексную, актыўную і рэактыўную магутнасці прымальніка, $\cos\varphi$.

Р а ш э н н е. 1. Дзейнае фазнае напружанне

$$U_ф = U_л / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Вызначым комплексныя фазныя напружанні. Прымем за зыходную разліковую велічыню комплекснае напружанне фазы A, сумясцім вектар дзейнага значэння напружання фазы А з воссю рэчаісных лікаў. Атрымаем:

$$\dot{U}_A = 220(\cos 0^\circ + j\sin 0^\circ) = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = 220\,[\cos(-120^\circ) + j\sin(-120^\circ)] = -110 - j\,190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = 220(\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ) = -110 + j\,190 \text{ В}.$$

2. Вызначым комплекснае значэнне фазных токаў:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{220}{10 + j\,5} = \frac{220(10 - j5)}{10^2 + 5^2} = 17{,}6 - j8{,}8 \text{ А}.$$

Модуль току

$$I_A = \sqrt{17{,}6^2 + 8{,}8^2} = 19{,}68 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z} = \frac{-110 - j190}{10 + j5} = \frac{(-110 - j190)(10 - j5)}{10^2 + 5^2} = -16{,}4 - j10{,}8 \text{ А}.$$

Модуль току

$$I_B = \sqrt{16{,}4^2 + 10{,}8^2} = 19{,}64 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z} = \frac{(-110 + j190)(10 - j5)}{10^2 + 5^2} = -1{,}2 + j19{,}6 \text{ А}.$$

Модуль току

$$I_C = \sqrt{1{,}2^2 + 19{,}6^2} = 19{,}64 \text{ А}.$$

3. Вызначым комплексную магутнасць прымальніка. Паколькі нагрузка сіметрычная, то магутнасць прымальніка роўная патроенай магутнасці адной фазы, гэта значыць, $\tilde{S} = 3\dot{U}_ф I^*_ф$. Возьмем магутнасць фазы B, атрымаем

$$\tilde{S} = 3\dot{U}_ф I^*_ф = 3(-110 - j190)(-16{,}4 + j10{,}8) = 3856 + j1928 \text{ В·А},$$

дзе P = 3856 Вт; Q = 1928 ВАр.

Модуль магутнасці

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 4311{,}14 \text{ В·А}.$$

4. $$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{10}{\sqrt{10^2 + 5^2}} = 0{,}8945.$$

Задача 12. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем U = 380 В падключаны зоркай асінхронны рухавік, комплекснае супраціўленне фазных абмотак якога Z = 8 + j6 Ом.

Вызначце комплексныя, актыўныя і рэактыўныя фазныя токі, комплексную, актыўную і рэактыўную магутнасці рухавіка, модуль магутнасці рухавіка і каэфіцыент магутнасці ($\cos\varphi$).

Р а ш э н н е. 1. Дзейнае фазнае напружанне

$$U_ф = U_а/\sqrt{3} \equiv 380m/\sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

2. Запішам комплексныя значэнні фазных напружанняў. Прымем за зыходную разліковую велічыню комплекснае напружанне фазы A. Сумясцім вектар напружання фазы A з воссю рэчаісных лікаў, атрымаем:

$$\dot{U}_A = U_A e^{j0^\circ} = U_A; \; \dot{U}_B = U_B e^{-j120^\circ}; \; \dot{U}_C = U_C e^{j120^\circ}.$$

3. Вызначым комплексныя актыўныя і рэактыўныя фазныя токі:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{U_A}{z e^{j36{,}87^\circ}} = \frac{U}{z} e^{-j36{,}87^\circ} = \frac{220}{10} e^{-j36{,}87^\circ} = 22e^{-j36{,}87^\circ} \text{ А}.$$

Аргумент φ вызначаем з формулы $\varphi = \operatorname{arctg} b/a = \operatorname{arctg} 0{,}75$. Значыць, φ = 36,87°.

Запішам формулу комплекснага току ў трыганаметрычным выглядзе:

$$\dot{I}_A = 22(\cos 36{,}87^\circ - j\sin 36{,}87^\circ) = 17{,}6 - j13{,}2 \text{ А},$$

дзе актыўны ток $I_а$ = 17,6 А, а рэактыўны $I_р$ = —j13,2 А.

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z} = \frac{Ue^{-j120^\circ}}{z e^{j36{,}87^\circ}} = \frac{220}{10} e^{-j156{,}87^\circ} = 22e^{-j156{,}87^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = 22(\cos 156{,}87^\circ - \sin 156{,}87^\circ) = -20{,}23 - j8{,}64 \text{А},$$

дзе актыўны ток $I_а$ = -20,23 А, а рэактыўны $I_р$ = $-j$8,64 А.

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z} = \frac{Ue^{j120^\circ}}{z e^{j36{,}87^\circ}} = \frac{220}{10} e^{j83{,}13^\circ} = 22e^{j83{,}13^\circ} \text{ А};$$

$$I_C = 22(\cos 83{,}13^\circ + j\sin 83{,}13^\circ) = 2{,}632 + j\,21{,}84 \text{ А},$$

дзе актыўны ток $I_а$ = 2,632 А, а рэактыўны $I_р$ = j21,84 А.

4. Вызначым комплексныя фазныя магутнасці рухавіка:

$$\tilde{S}_A = \dot{U}_A I_A^* = 220 \cdot 22e^{j36,87^\circ} = 4840e^{j36,87^\circ} \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\tilde{S}_B = \dot{U}_B I_B^* = U_B e^{-j120^\circ} \cdot I_B e^{j156,87^\circ} = 4840e^{j36,87^\circ} \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\tilde{S}_C = \dot{U}_C I_C^* = U_C e^{j120^\circ} \cdot I_C e^{-j83,13^\circ} = 4840e^{j36,87^\circ} \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Запішам фазныя магутнасці ў трыганаметрычным выглядзе:

$$\tilde{S}_A = \tilde{S}_B = \tilde{S}_C = 4840(\cos 36,87^\circ + j \sin 36,87^\circ) = 3872 + j2904 \text{ В} \cdot \text{А},$$

дзе актыўная магутнасць P = 3872 Вт, а рэактыўная Q = 2904 ВАр.

Магутнасць рухавіка

$$\tilde{S} = 3\tilde{S}_ф = 3(3872 + j2904) = 11616 + j8712 \text{ В} \cdot \text{А},$$

дзе

$$P = 11616 \text{ Вт}; \; Q = 8712 \text{ ВАр}.$$

Модуль магутнасці рухавіка

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 14,52 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Каэфіцыент магутнасці рухавіка можна вылічыць паводле формулы

$$\cos\varphi = \frac{11616}{14520} = 0,8, \text{ або } \cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{8}{10} = 0,8.$$

Задача 13. У трохфазную сетку лінейным напружаннем $U_л$ = 380 В падключаны зоркай без нулявога проваду тры прымальнікі, супраціўленні якіх адпаведна роўныя: r_A = 12 Ом; X_{CA} = 16 Ом; r_B = 12 Ом; x_{LB} = 16 Ом; r_C = 16 Ом; x_{CC} = 12 Ом. Вызначыць фазныя напружанні і токі ў прымальніках.

Р а ш э н н е 1. Выразім супраціўленні і праводнасці прымальнікаў у комплексным выглядзе:

$$Y_A = \frac{1}{12 - j16} = \frac{12 + j16}{12^2 + 16^2} = 0,03 + j0,04 \text{ См};$$

$$Y_B = \frac{1}{12 + j16} = \frac{12 - j16}{12^2 + 16^2} = 0,03 - j0,04 \text{ См};$$

$$Y_C = \frac{1}{16 - j12} = \frac{16 + j12}{16^2 + 12^2} = 0,04 + j0,03 \text{ См}.$$

2. Запішам фазныя напружанні сеткі. Дзейнае фазнае напружанне сеткі $U_ф = U_л/\sqrt{3} = 220$ В. Прымем за зыходную разліковую велічыню комплекснае напружанне фазы A. Сумясцім вектар напружання фазы з воссю рэчаісных лікаў. Тады

$$\dot{U}_A = 220(\cos 0° + j \sin 0°) = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = 220 [\cos(-120°) + j \sin(-120°)] = -110 - j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = 220 (\cos 120° + j \sin 120°) = -110 + j190 \text{ В}.$$

3. Вызначым напружанне зрушэння нейтралі паводле формулы

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

$$\dot{U}_N = [220(0{,}03 + j0{,}04) + (-110 - j190)(0{,}03 - j0{,}04) + (-110 + j190) \times$$

$$\times(0{,}04 + j0{,}03)] (0{,}03 + j0{,}04 + 0{,}03 - j0{,}04 + 0{,}04 + j0{,}03)^{-1} =$$

$$= \frac{-14{,}4 + j11{,}8}{0{,}1 + j0{,}03} = \frac{(-14{,}4 + j11{,}8)(0{,}1 - j0{,}03)}{0{,}011} = -100 + j148 \text{ В}.$$

4. Вылічым фазныя напружанні на нагрузцы:

$$\dot{U}_{A'} = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 220 + 100 - j148 = 320 - j148 \text{ В};$$

модуль

$$U_A = \sqrt{320^2 + 148^2} = 352{,}5 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{B'} = \dot{U}_B - \dot{U}_N = -110 - j190 + 100 - j148 = -10 - j338 \text{ В};$$

модуль

$$U_{B'} = \sqrt{10^2 + 338^2} = 338{,}2 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C'} = \dot{U}_C - \dot{U}_N = -110 + j190 + 100 - j148 = -10 - j42 \text{ В};$$

модуль

$$U_{C'} = \sqrt{10^2 + 42^2} = 43{,}2 \text{ В}.$$

Напружанні на фазах A і B перавышаюць намінальныя напружанні, і прымальнікі могуць перагарэць.

5. Вызначым фазныя токі прымальніка:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A{}' Y_A = (320 - j148)(0{,}03 + j0{,}04) = 15{,}52 + j8{,}36 \text{ А};$$

модуль

$$I_A = \sqrt{15{,}52^2 + 8{,}36^2} = 17{,}63 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_B' Y_B = (-10 - j338)(0{,}03 - j0{,}04) = -13{,}82 - j9{,}74 \text{ A};$$

модуль

$$I_B = \sqrt{13{,}82^2 + 9{,}74^2} = 16{,}91 \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_C' Y_C = (-10 - j42)(0{,}04 + j0{,}03) = -1{,}66 + j1{,}38 \text{ A};$$

модуль

$$I_C = \sqrt{1{,}66^2 + 1{,}38^2} = 2{,}16 \text{ A}.$$

Задача 14. У трохфазную сетку з лінейным напружаннем $U = 220$ В падключаны трохвугольнікам тры прымальнікі супраціўленнем $Z = 16 + j12$ Ом. Вызначыць фазныя і лінейныя токі.

Р а ш э н н е. 1. Запішам комплексныя фазныя напружанні:

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB} = 220 \text{ B};$$

$$\dot{U}_{BC} = 220[\cos(-120^\circ) + j\sin(-120^\circ)] = -110 - j190 \text{ B};$$

$$\dot{U}_{CA} = 220(\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ) = -110 + j190 \text{ B}.$$

2. Вызначым фазныя токі:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{220(16 - j12)}{16^2 + 12^2} = \frac{3520 - j2\,640}{400} = 8{,}8 - 6{,}6 \text{ A};$$

$$I_{AB} = \sqrt{8{,}8^2 + 6{,}6^2} = 11 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{(-110 - j190)(16 - j12)}{400} = -10{,}1 - j4{,}3 \text{ A};$$

$$I_{BC} = \sqrt{10{,}1^2 + 4{,}3^2} = 11 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{(-110 + j190)(16 - j12)}{400} = 1{,}3 + j10{,}9 \text{ A};$$

$$I_{CA} = \sqrt{1{,}3^2 + 10{,}9^2} = 11 \text{ A}.$$

3. Вызначым лінейныя токі:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 8{,}8 - j6{,}6 - 1{,}3 - j10{,}9 = 7{,}5 - j17{,}5 \text{ A};$$
$$I_A = \sqrt{7{,}5^2 + 17{,}5^2} = 19 \text{ A};$$
$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -10{,}1 - j4{,}3 - 8{,}8 + j6{,}6 = -18{,}9 + j2{,}3 \text{ A};$$
$$I_B = \sqrt{18{,}9^2 + 2{,}3^2} = 19 \text{ A};$$
$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 1{,}3 + j10{,}9 + 10{,}1 + j4{,}3 = 11{,}4 + j15{,}2 \text{ A};$$
$$I_C = \sqrt{11{,}4^2 + 15{,}2^2} = 19 \text{ A}.$$

Задача 15. Складзіце схему маставога выпрамніка для сілкавання прымальніка магутнасцю $P_0 = 300$ Вт пры напружанні $U_0 = 100$ В, выкарыстаўшы адзін з дыёдаў:

Д222 ($I_{дап}$ = 0,4 А, $U_{адв}$ = 500 В); Д215Б ($I_{дап}$ = 2 А, $U_{адв}$ = 200 В); КД202Н ($I_{дап}$ = 1 А, $U_{адв}$ = 500 В).

Р а ш э н н е. 1. Ток прымальніка

$$I_0 = P_0/U_0 = 300/100 = 3\ А.$$

2. Ток у вентылі пры маставой схеме выпрамніка

$$I_В = 0{,}5I_0 = 0{,}5 \cdot 3 = 1{,}5\ А.$$

3. Адваротнае напружанне для маставой схемы выпрамніка

$$U_В = 1{,}57U_0 = 157\ В.$$

Такім чынам, выбіраюць дыёд для маставой схемы выпрамніка паводле ўмовы $I_{дап} > I_B$ і $U_{адв} > U_B$. Такім дыёдам з'яўляецца Д215Б, таму што 2 А > 1,5 А і 200 В > 157 В.

Задача 16. Складзіце схему двухпаўперыяднага выпрамніка з сярэдняй кропкай для сілкавання пастаянным токам прымальніка магутнасцю P_0 = 250 Вт і напружання U_0 = 100 В пры выкарыстанні дыёдаў тыпу Д243Б.

Р а ш э н н е. 1. Ток прымальніка $I_0 = P_0/U_0 = 250/100 = 2{,}5$ А.

2. Ток праз дыёд па дадзенай схеме выпрамніка вызначаецца паводле формулы $I_В = 0{,}5\ I_0$, значыць $I_В = 0{,}5 \cdot 2{,}5 = 1{,}25$ А, а адваротнае напружанне на дыёдзе $U_В = \pi U_0$, значыць $U_В = 3{,}14 \cdot 100 = 314$ В.

3. Дыёд Д243Б з параметрамі $I_{дап}$ = 2 А і $U_{адв}$ = 200 В задавальняе па току $I_{дап} > I_В$, а па напружанні не задавальняе $U_{адв} < U_В$. Такім чынам, трэба браць два дыёды і злучаць іх паслядоўна.

ЛІТАРАТУРА

Агульная электратэхніка / Пад рэд. А. Ц. Блажкіна. — М.; Л.: Энергія, 1979.

Атамалян Э. Г. Прыборы і метады вымярэння электрычных велічынь. — М.: Выш. шк., 1989.

Гусеў М. М., *Мельцэр Б. М.* Устройства і мантаж электраабсталявання. — Мн.: Выш. шк., 1979.

Касаткін А. С., *Нямцоў М. В.* Электратэхніка. — М.: Энергаатамвыд, 1983.

Кітуновіч Ф. Р. Электратэхніка. — Мн.: Выш. шк., 1991.

Лепаяў Д. А. Даведнік слесара па рамонту бытавых электрапрыбораў і машын. — М.: Лёгпрамбытвыд, 1988.

Метады электрычных вымярэнняў / Пад рэд. Э. І. Цвяткова. — Л.: Энергаатамвыд, 1990.

Паўлоўскі А. І., *Пенкрат В. У.*, *Кузняцоў А. Ц.*, *Насеннікава Л. М.* Інфарматыка і вылічальная тэхніка. — Мн.: Народная асвета, 1988.

Ракус Р. Р., *Часнакоў В. М.* Лабараторныя работы па электратэхніцы і асновах электронікі. — М.: Выш. шк., 1989.

Усс Л. В., *Красько С. А.*, *Клімовіч Г. С.* Агульная электратэхніка з асновамі электронікі. — Мн.: Выш. шк., 1990.

ПРАДМЕТНЫ ПАКАЗАЛЬНІК

Абмотка другасная 152
— першасная 152
— петлявая 265
— ўзбуджэння 240, 266
— фазная 240
— хвалевая 266
— якарная 265
Аказанне першай дапамогі пры паражэнні токам 364
Амперметр 85
Амплітуда пераменнага току 12
Анод тырыстара 188
Аргумент комплекснага ліку 15
Аўтаматычнае кіраванне 310
— рэгуляванне 310
Аўтаматычны кантроль 307, 308
Аўтатрансфарматар 167

Вальтметр 86
Ватметр актыўнай магутнасці 98, 128
— рэактыўнай магутнасці 99, 131
— трохфазны 130, 145
Вектарная дыяграма напружання і току 22, 23, 28, 30, 60
— — работы сінхроннага генератара 246, 251, 252
— — рабочага рэжыму трансфарматара 158
— — рэзанансу току 40, 41
— — фазных і лінейных напружанняў 62, 63
— — халастога ходу трансфарматара 155
Вольт-амперная характарыстыка дыёда 185
— — лінейнага элемента 20
— — нелінейнага элемента 20, 185
— — тырыстара 189
Вымярэнне актыўнай магутнасці 128, 139, 145
— ёмістасці 122
— індуктыўнасці 127
— напружання 86, 140
— пастаяннага току 85
— рэактыўнай магутнасці 131
— супраціўлення 112, 142
Вярчальнае магнітнае поле 212
Вярчальны момант асінхроннага рухавіка 219
— — рухавіка пастаяннага току 280, 287
— — сінхроннага рухавіка 248

Ґенератар пастаяннага току 264
— — — з незалежным узбуджэннем 273
— — — з паралельным узбуджэннем 273
— — — з паслядоўным узбуджэннем 276
— — — са змешаным узбуджэннем 277
— трохфазны сінхронны 239
Гідраэлектрастанцыі 341
— дэрывацыйныя 342
— прыплацінныя 343
Графікі аднапаўперыяднага выпрамлення 193
— вярчальнага моманту асінхроннага рухавіка 220
— двухпаўперыяднага выпрамлення 193
— імгненнай магутнасці 44

— напружання, току і ЭРС 23, 39
— супраціўленняў 39
— трохфазнага выпрамлення 197
— трохфазнага току 58, 191

Дабротнасць контуру 37
Дытчыкі 135—137, 302—304
Дзейнае значэнне пераменнага току 13
Дыёд 184
— германіевы 186
— крэмніевы 187
— селенавы 185

Зазямленне 360, 363
Закон Джоўля—Ленца 13, 352
— Кірхгофа 30
— Ленца 156
— Ома 21, 26, 30
— — ў комплексным выглядзе 31
— электрамагнітнай індукцыі 22, 154
Зануленне 362, 363
Зрух фаз 12, 17, 33

Імгненнае значэнне пераменнага току 9
Інвертар 191
Індуктыўны элемент ланцуга 22

Кадзіраванне 95
Калектар 263
Кампенсатар сінхронны 252
Камутацыя 272
Каэфіцыент вяртання 312
— карыснага дзеяння асінхроннага рухавіка 219
— — — генератара пастаяннага току 268, 269
— — — рухавіка пастаяннага току 281
— — — трансфарматара 159
— магутнасці 45
— нагрузкі 160
— пульсацыі 196
— трансфармацыі 155
Кіраванне асінхронным рухавіком 224, 229
Клас дакладнасці прыбора 75
Комплексная амплітуда 25, 28
— — ЭРС 58
Комплексны лік 15
— — спалучаны 16

Лагометр 113
Лініі электраперадачы 20, 351
— высакавольтныя 353
— кабельныя 352
— нізкавольтныя 352
— паветраныя 351
Лічыльнік электраэнергіі 104, 105
— — трохфазны 108
Люмінесцэнтныя лямпы высокага ціску (ДРЛ) 320
— — — — ксенонавыя 321
— — — — натрыевыя 321
— — нізкага ціску 314
— — — — з расшчэпленай фазай 318
— — — — бесстартэрныя 319

Магнітны паток рабочы 153
— — рассеяння 153, 244
— — статара 244
— пускальнік 230
магутнасць актыўная 43, 45
— генератара пастаяннага току 268
— імгненная 43
— комплексная 46
— рэактыўная 44, 45
— сінхроннага генератара 248
— сярэдняя за перыяд 45
— трохфазнага току 68
маркіроўка паўправадніковых прыбораў 188, 191
Машыны пастаяннага току 263

Мегометр 112
Меры засцярогі ад паражэння электрычным токам 358
Модуль комплекснага ліку 15
— праводнасці 35
— супраціўлення 31

Нагрузка актыўная 21
— — ёмістасная 27
— — індуктыўная 23
— фаз несіметрычная 62
— — сіметрычная 59, 61
Напружанне комплекснае 25, 30
— лінейнае 61
— пераменнае 11
— фазнае 61

Омметр 112

Пастаянная прыбора 76
— лічыльніка 107
— — намінальная 108
— — сапраўдная 109
Перадача электраэнергіі 351
Перыяд камутацыі секцый 272
— пераменнага току 12
Правіла Ленца 24
Праводнасць актыўная 34
— комплексная 34
— рэактыўная 34
Прыборы дэтэктарныя 111
— індукцыйныя 104
— камбінаваныя 43101 115
— — лічбавыя Шч4300 119
— лічбавыя 95, 96, 100, 103
— магнітаэлектрычныя 82
— непасрэднай ацэнкі 74
— параўнання 74
— тэрмаэлектрычныя 110
— ферадынамічныя 91
— электрадынамічныя 91
— электрамагнітныя 87
Пуск асінхронных рухавікоў 224
— — — з каротказамкнутым ротарам 225
— — — з фазным ротарам 224
— рухавікоў пастаяннага току 283, 288

Рабочы рэжым трансфарматара 156
Разлік трансфарматара 175
Ротар каротказамкнуты 211
— сінхроннага генератара 240
— фазны 211
Рухавік аднафазны 233
— калектарны пераменнага току 290
— пастаяннага току 279
— — — з паралельным узбуджэннем 282
— — — з паслядоўным узбуджэннем 287
— трохфазны асінхронны 209
— — сінхронны 254
Рэастат 18
— пускавы 224, 296
— рэгулявальны 229, 297
Рэверсаванне асінхроннага рухавіка 228
— рухавіка пастаяннага току 280
Рэзананс напружання 36, 37
— току 40
Рэзістар 18
Рэле максімальнага току 304
— прамежкавае 306
— цеплавое 231
— часу 305, 314
— электрамагнітнае 305
Самаход лічыльніка 107
Свяцільнікі 322
Скін-эфект 19
Сродкі індывідуальнай электразасцярогі 359
Структурныя схемы лічбавых прыбораў 96, 101, 119, 124, 126
Супраціўленне актыўнае 18
— амічнае 18
— ёмістаснае 29
— індуктыўнае 25

— комплекснае 17, 30
— поўнае комплекснае 30
— рэактыўнае 17, 30
— хвалевае 37
Схема аднафазнага асінхроннага рухавіка 234
— аўтаматычнага рэгулявання напружання 247
— аўтатрансфарматарнага пуску асінхроннага рухавіка 226
— выпрамніка аднапаўперыяднага 193
— — ВС-24М 203
— — ВУП-2 204, 207
— — двухпаўперыяднага 193
— — маставая 194, 207
— — трохфазнага выпрамлення 197, 198
— высакавольтнай лініі 353
— вярчальнага магнітнага поля 213—215
— даследавання рэлейнай засцярогі з вытрымкай часу 312
— — рэле максімальнага току 313
— — рэле часу 314
— злучэння абмотак трохфазнага трансфарматара 164
— — нагрузкі трохвугольнікам 66, 71
— — фаз зоркай 61, 71
— магнітнага пускальніка 230
— моста для вымярэння індуктыўнасці 127
— — — ёмістасці кандэнсатара 123
— неразгалінаванага ланцуга 30, 50
— пуску асінхроннага рухавіка з фазным ротарам 225
— разгалінаванага ланцуга 33, 54
— разметкі вывадаў трохфазнага трансфарматара 180, 181
— рэверсавання 228
— ўключэння аднафазнага ватметра ў ланцуг 98, 139
— — — — ў трохфазны ланцуг 129, 132, 133, 145
— — амперметра, вальтметра, ватметра, фазометра ў ланцуг 140
— — вымяральнага трансфарматара напружання ў ланцуг 172
— — лічыльніка ў ланцуг 105, 108, 148
— — люмінесцэнтных лямпаў у сетку 317, 319, 320
— — трансфарматара току ў ланцуг 171
— — трохфазнага ватметра ў ланцуг 145
— — трохфазнага рухавіка ў аднафазную сетку 236, 237
— ўстройства карэктара 81
— ферарэзананснага стабілізатара 174
— электразасцярогі 361, 362
— энергетычнай сістэмы 355

Тармажэнне процiўключэннем 229
— рэкуператыўнае 229
Ток аднафазны пераменны 9
— зрушэння 27
— кароткага замыкання 162
— комплексны 17
— лінейны 61
— пускавы 218, 224
— трохфазны 57
— фазны 61
— халастога ходу 154
Трансфарматар аднафазны 151
— бранявы 152
— вымяральны 170
— — напружання 172
— — току 171
— стрыжнявы 152
— трохфазны 163
Трохвугольнік магутнасці 46
— праводнасці 33
— супраціўлення 23, 30
Трохфазная сістэма 57, 209
Тырыстар 188
Тэрмістар 136
Тэхніка бяспекі 357

Устаноўка на апорах 80, 81
— — падвесе 80
— — расцяжках 80

Фаза 12
Фазометр 101, 102
— лікавы 103
Фарадаметр 122
— лікавы 123, 124

Халасты ход трансфарматара 153
Характарыстыкі асінхроннага рухавіка 212
— — — механічная 223
— — — рабочыя 222
— генератара пастаяннага току 273
— — — — знешнія 275, 276, 277
— — — — рэгулявальная 275, 277
— — — — халастога ходу 274
— рухавіка пастаяннага току 284
— — — — механічныя 286, 289
— — — — рабочыя 285, 288
— — — — рэгулявальная 286
— — — — халастога ходу 285
— сінхроннага генератара 244
— — — знешнія 246
— — — рэгулявальная 247
— — рухавіка 255
Хібнасць абсалютная 75
— адносная 75

Частата 12
— вуглавая 12
— вярчэння магнітнага поля 214
— — ротара 216, 242
Частатамер 125

Шунты 85

Электрагрыль 328
Электракававарка 328
Электракамін 331
Электраканвектар 331
Электракаструля 327
Электракіпяцільнік 330
Электрапеч «Цуда» 327
Электрапліта «Электра 1001" 325
Электраплітка двухканфорачная 327
Электраправодка 333
Электрасамавар 330
Электрастанцыя 338
— атамная (АЭС) 344
— ветраэлектрычная 351
— газатурбінная 340
— геліяэлектрычная 350
— гідраэлектрычная (ГЭС) 341
— магнітагідрадынамічная (МГД) 341
— паратурбінная 338
ЭРС пераменная 10

ЗМЕСТ

Прадмова . . . 3

Уводзіны . . . 4

1. Электрычны ланцуг аднафазнага пераменнага току . . . 9

1.1. Аднафазны пераменны ток . . . 9

1.2. Дзейнае і сярэдняе значэнні пераменнага току . . . 13

1.3. Выраз фізічных велічынь комплекснымі лікамі . . . 15

1.4. Класіфікацыя электрычных ланцугоў пераменнага току . . . 18

1.5. Ланцуг пераменнага току з рэзістыўным і індуктыўным элементамі . . 21

1.6. Ланцуг пераменнага току з кандэнсатарам . . . 27

1.7. Электрычны ланцуг з паслядоўным злучэннем рэзістыўнага, індуктыўнага і ёмістаснага супраціўленняў . . . 30

1.8. Электрычны ланцуг з паралельным злучэннем супраціўленняў . . . 33

1.9. Рэзананс у электрычных ланцугах . . . 36

1.10. Магутнасць у ланцугу пераменнага току . . . 43

Лабараторная работа 1 . . . 49

Лабараторная работа 2 . . . 53

2. Трохфазныя электрычныя ланцугі . . . 57

2.1. Атрыманне трохфазнай сістэмы . . . 57

2.2. Злучэнне трохфазнай сістэмы зоркай . . . 60

2.3. Злучэнне трохфазнай сістэмы трохвугольнікам . . . 66

2.4. Магутнасць трохфазнага ланцуга пераменнага току . . . 68

Лабараторная работа 3 . . . 69

3. Электравымяральныя прыборы і электрычныя вымярэнні . . . 74

3.1. Класіфікацыя электравымяральных прыбораў . . . 74

3.2. Асноўныя вузлы электравымяральных прыбораў . . . 79

3.3. Магнітаэлектрычныя прыборы . . . 82

3.4. Электрамагнітныя прыборы . . . 87

3.5. Электрадынамічныя і ферадынамічныя прыборы 91
3.6. Лічбавыя вымяральныя прыборы 95
3.7. Ватметры 98
3.8. Фазометр 101
3.9. Індукцыйныя прыборы 104
3.10. Тэрмаэлектрычныя і дэтэктарныя прыборы 110
3.11. Омметр. Мегаомметр 112
3.12. Прыбор электравымяральны камбінаваны 43101 115
3.13. Прыбор камбінаваны лічбавы Шч 4300 119
3.14. Вымярэнне ёмістасці. Фарадаметр 122
3.15. Частатамеры 125
3.16. Вымярэнне індуктыўнасці катушкі 127
3.17. Вымярэнне актыўнай магутнасці ў трохфазным ланцугу 128
3.18. Вымярэнне рэактыўнай магутнасці ў трохфазным ланцугу 131
3.19. Вымярэнне неэлектрычных велічынь электрычным метадам 134
Лабараторная работа 4 138
Лабараторная работа 5 141
Лабараторная работа 6 144
Лабараторная работа 7 147

4. Трансфарматары 151
4.1. Аднафазныя трансфарматары 151
4.2. Рэжым халастога ходу трансфарматара 153
4.3. Рабочы рэжым трансфарматара 156
4.4. ККД трансфарматара 159
4.5. Устройства і прынцып работы трохфазных трансфарматараў 163
4.6. Аўтатрансфарматары. Рэгулятар напружання школьны (РНШ) . . . 167
4.7. Вымяральныя трансфарматары 170
4.8. Ферарэзанансны стабілізатар напружання 174
4.9. Прасцейшы разлік трансфарматараў 175
Лабараторная работа 8 177
Лабараторная работа 9 179

5. Нелінейныя элементы ланцуга. Выпрамнікі 184
5.1. Нелінейныя элементы ў ланцугу пераменнага току 184
5.2. Выпрамляльныя схемы 192
5.3. Школьныя выпрамнікі тыпаў ВС і ВУП 203
Лабараторная работа 10 206

6. **Машыны пераменнага току** . . . 209

6.1. Прынцып работы і пабудовы трохфазных асінхронных рухавікоў . . . 209

6.2. Вярчальнае магнітнае поле трохфазнай сістэмы пераменнага току . . . 212

6.3. Слізгаценне . . . 216

6.4. Вярчальны момант і ККД асінхронных рухавікоў . . . 219

6.5. Рабочыя характарыстыкі . . . 222

6.6. Кіраванне асінхроннымі рухавікамі . . . 224

6.7. Аднафазныя асінхронныя рухавікі . . . 233

6.8. Устройства і прынцып дзеяння трохфазнага сінхроннага генератара . . . 239

6.9. ЭРС генератара і рэакцыя статара . . . 241

6.10. Вектарныя дыяграмы і характарыстыкі сінхроннага генератара пры рознай нагрузцы . . . 244

6.11. Электрамагнітная магутнасць і вярчальны момант сінхроннага генератара . . . 248

6.12. Работа сінхроннага генератара, уключанага ў сетку на паралельную работу . . . 250

6.13. Сінхронны рухавік, вуглавая і механічная характарыстыкі . . . 254

Лабараторная работа 11 . . . 256

Лабараторная работа 12 . . . 260

Лабараторная работа 13 . . . 261

7. **Машыны пастаяннага току** . . . 263

7.1. Устройства і прынцып работы машын пастаяннага току . . . 263

7.2. ЭРС, магутнасць і ККД генератара . . . 268

7.3. Рэакцыя якара. Камутацыя . . . 270

7.4. Генератары пастаяннага току і іх асноўныя характарыстыкі . . . 273

7.5. Рухавікі пастаяннага току . . . 279

7.6. Рухавікі пастаяннага току з паралельным узбуджэннем . . . 282

7.7. Характарыстыкі рухавіка з паралельным узбуджэннем . . . 284

7.8. Рухавікі пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем . . . 287

7.9. Калектарны рухавік пераменнага току . . . 290

Лабараторная работа 14 . . . 291

Лабараторная работа 15 . . . 295

8. **Элементы аўтаматыкі** . . . 301

8.1. Асноўныя тыпы датчыкаў і рэле . . . 301

8.2. Аўтаматычны кантроль, кіраванне і рэгуляванне . . . 307

Лабараторная работа 16 . . . 311

9. Бытавая электратэхніка 316
9.1. Электрычныя крыніцы святла 316
9.2. Награвальныя прыборы 324
9.3. Электраправодка 333

10. Вытворчасць, перадача і размеркаванне электраэнергіі 338
10.1. Электрычныя станцыі 338
10.2. Перадача і размеркаванне электрычнай энергіі 351

11. Элементы тэхнікі бяспекі 357
11.1. Асаблівасці паражэння чалавека электрычным токам 357
11.2. Меры засцярогі ад паражэння электрычным токам 358
11.3. Аказанне першай дапамогі пры паражэнні электрычным токам . . .364

Прыклады рашэння задач 368
Літаратура 382
Прадметны паказальнік 383

Вучэбнае выданне

КІТУНОВІЧ Фёдар Рыгоравіч

ЭЛЕКТРАТЭХНІКА

Рэдактар *Э. М. Капрова*
Мастацкі рэдактар *А. Г. Званароў*
Тэхнічны рэдактар *А. І. Маль*
Карэктар *Л. А. Ярковіч*
Аператары *І. С. Аляксевіч, І. В. Скубій, А. І. Маль*

Падпісана да друку з арыгінала-макета 26.06.97. Фармат 60х90/16. Папера газетн. Гарнітура Таймс. Друк афсетны. Умоўн. друк. арк. 24,5. Ул.-выд. арк. 23,17. Тыраж 1000 экз. Зак. 5287.

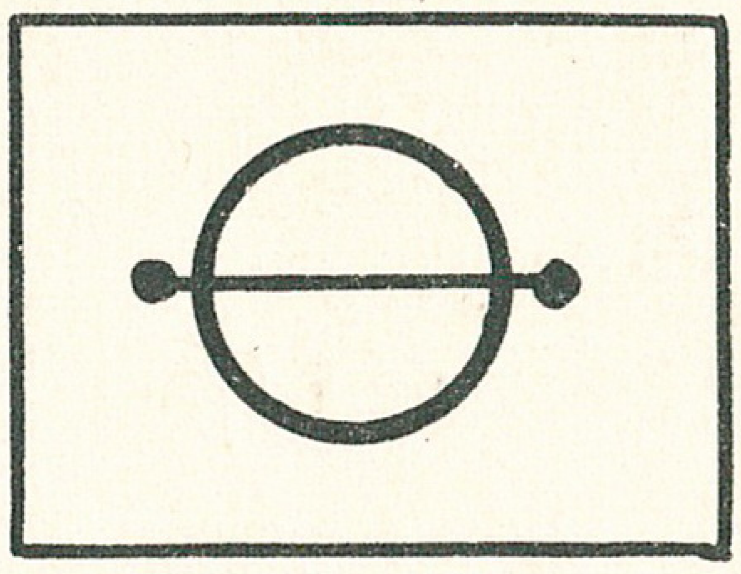
Дзяржаўнае прадпрыемства выдавецтва «Вышэйшая школа» Дзяржаўнага камітэта Рэспублікі Беларусь па друку. Ліцэнзія ЛВ № 5 ад 16.01.93. 220048, Мінск, праспект Машэрава, 11.

Друкарня «Перамога». 222310, Маладзечна, вул. Таўлая, 11.

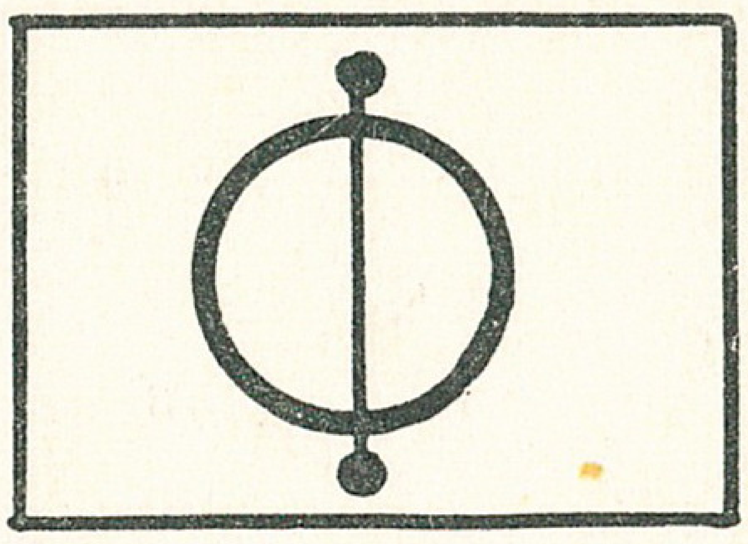
58500

УМОЎНЫЯ АБАЗНАЧЭННІ НА СХЕМАХ

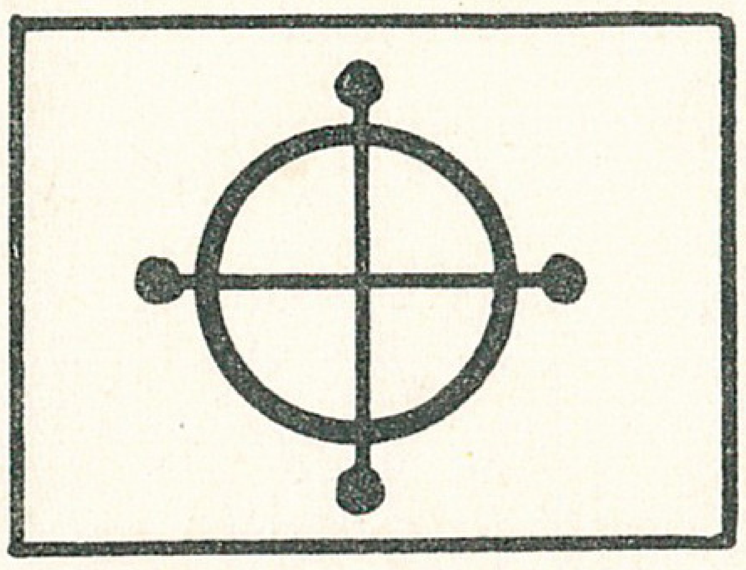
Амперметр аднаабмотачны



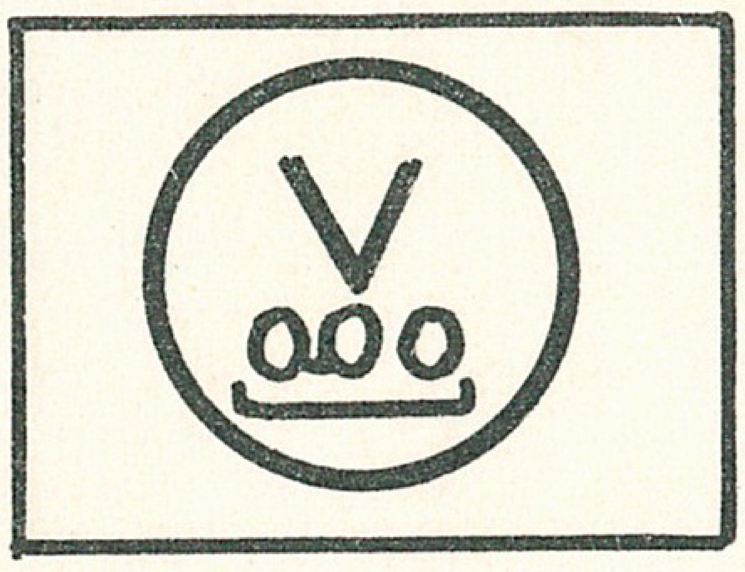
Вальтметр аднаабмотачны



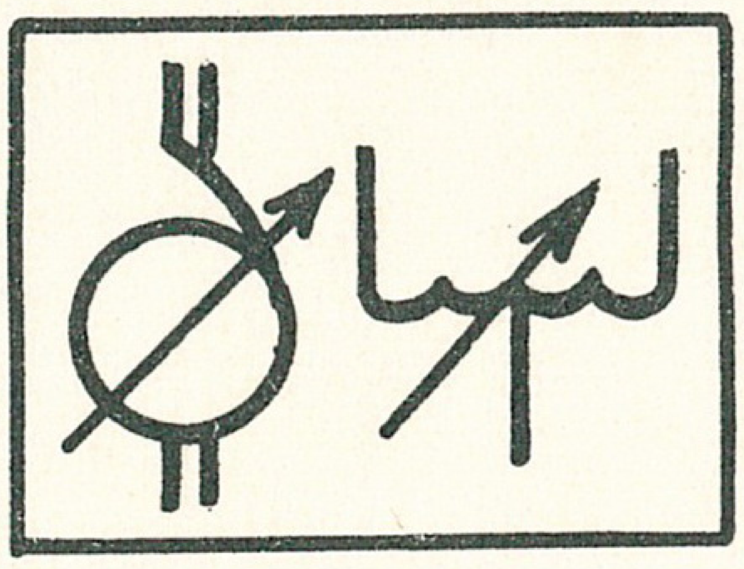
Ватметр аднафазны



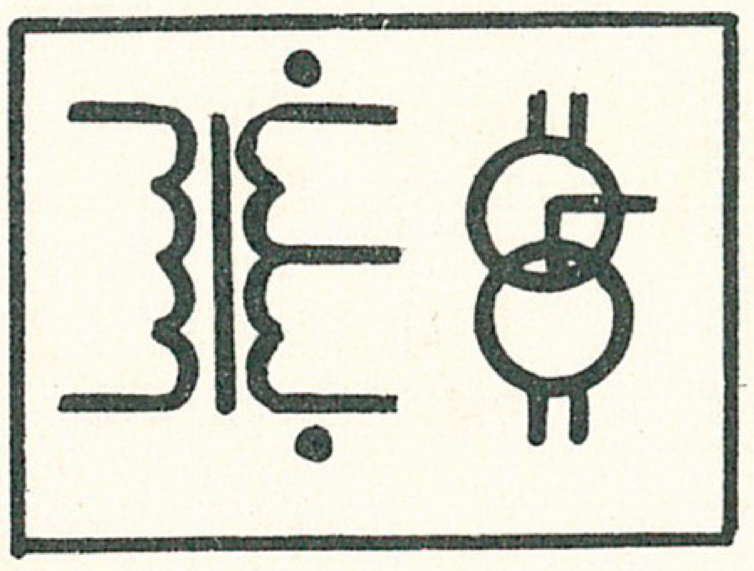
Вальтметр з лічбавым адлікам



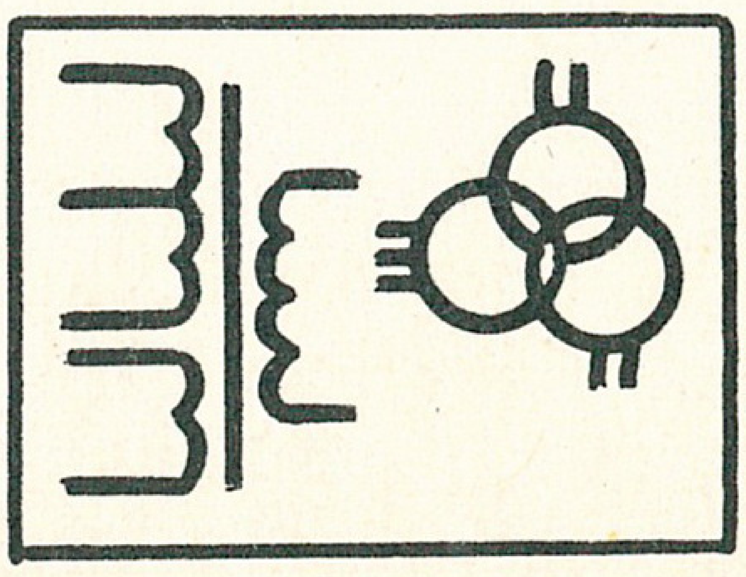
Аўтатрансфарматар аднафазны з рэгуляваннем напружання



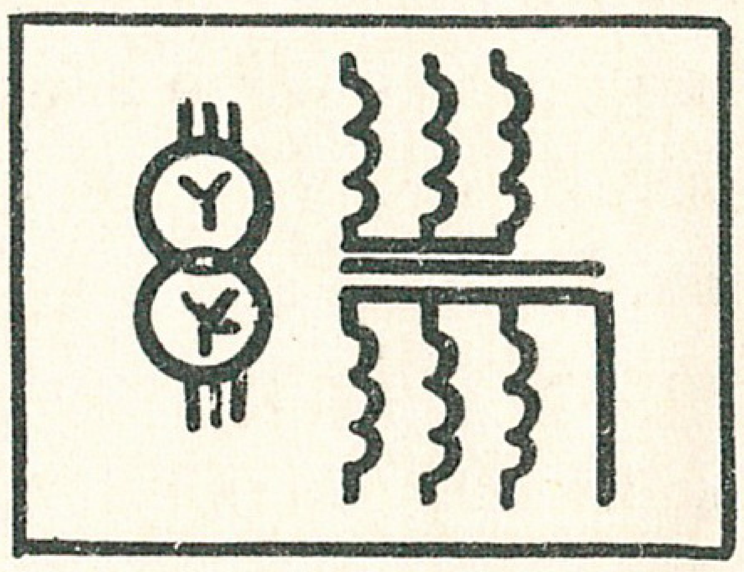
Трансфарматар дыферэнцыяльны (з адгалінаваннем ад сярэдняга пункта адной абмоткі)



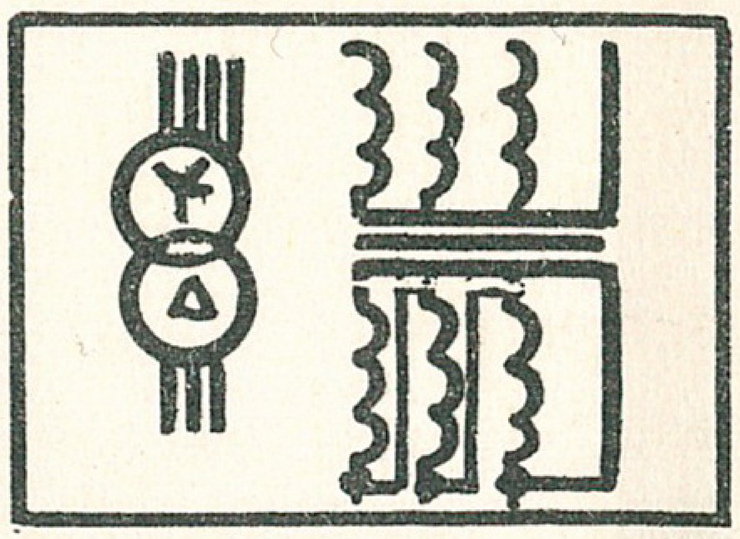
Трансфарматар аднафазны з ферамагнітным магнітапровадам трохабмотачны



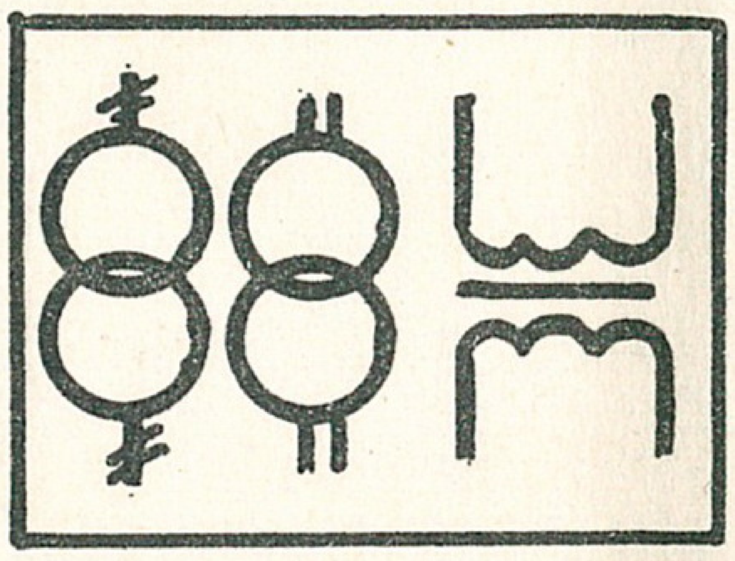
Трансфарматар трохфазны з ферамагнітным магнітапровадам; злучэнне абмотак "зорка-зорка з выведзеным нейтральным пунктам"



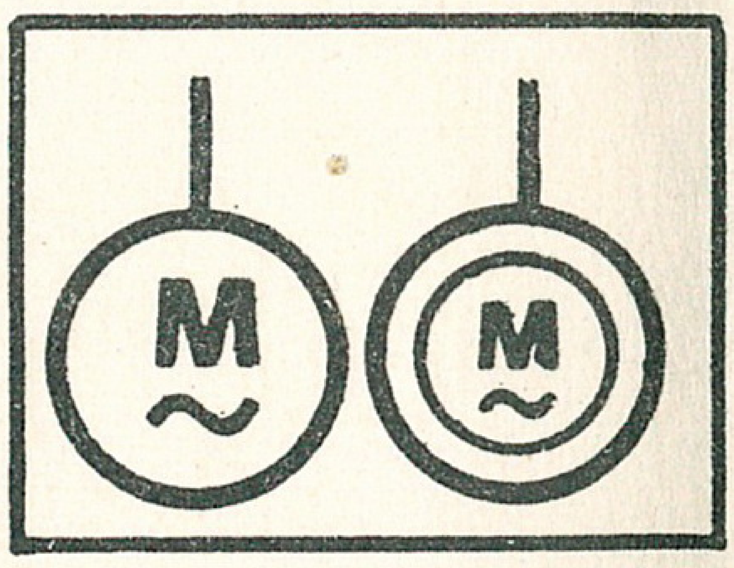
Трансфарматар трохфазны з ферамагнітным магнітапровадам; злучэнне абмотак "зорка з выведзеным нейтральным пунктам - трохвугольнік"



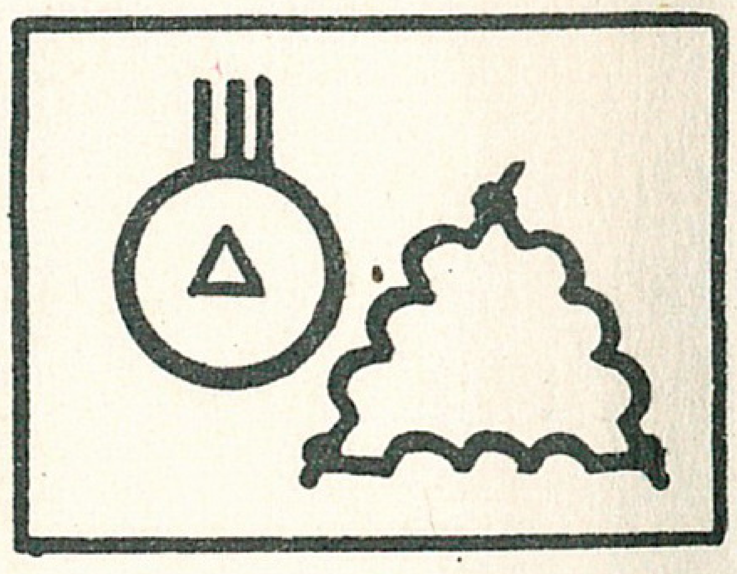
Трансфарматар напружання вымяральны



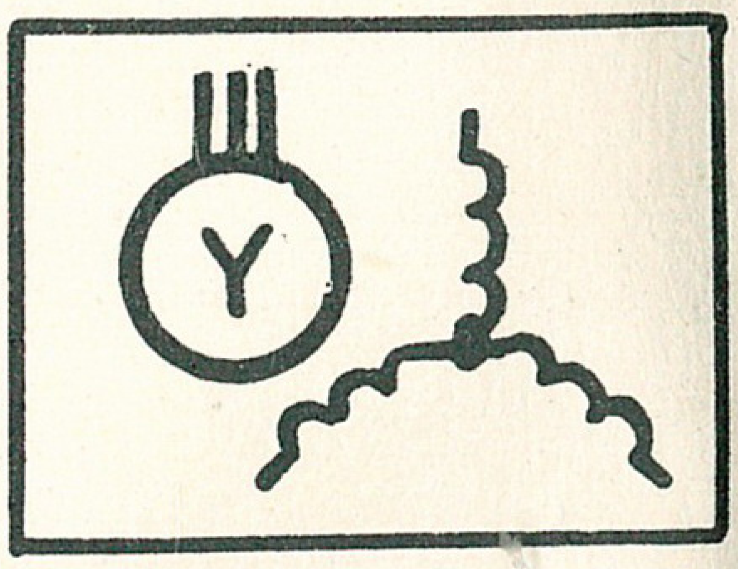
Рухавік асінхронны з каротказамкнутым ротарам



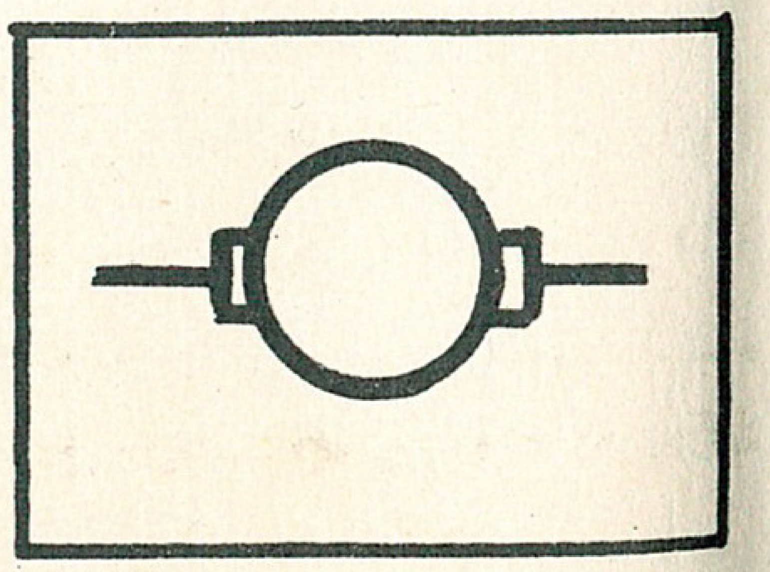
Рухавік асінхронны трохфазны, злучаны ў трохвугольнік, з каротказамкнутым ротарам



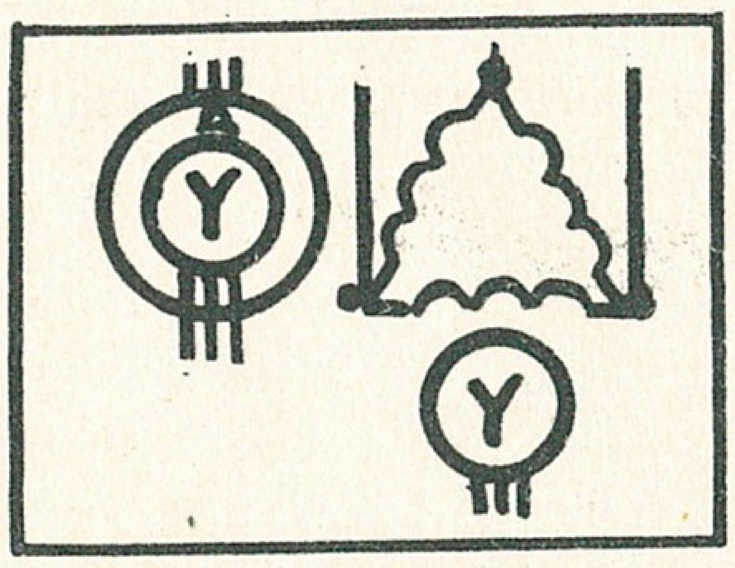
Рухавік асінхронны трохфазны, злучаны ў зорку, з каротказамкнутым ротарам



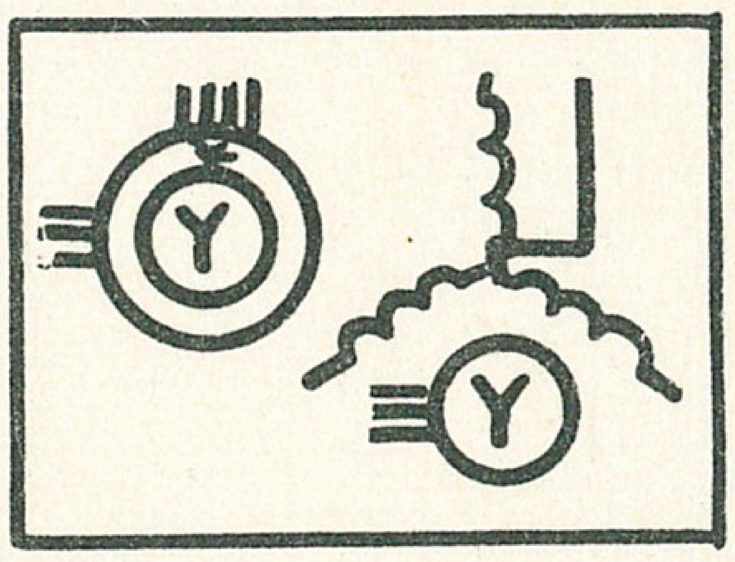
Ротар з абмоткай, калектарам і шчоткамі



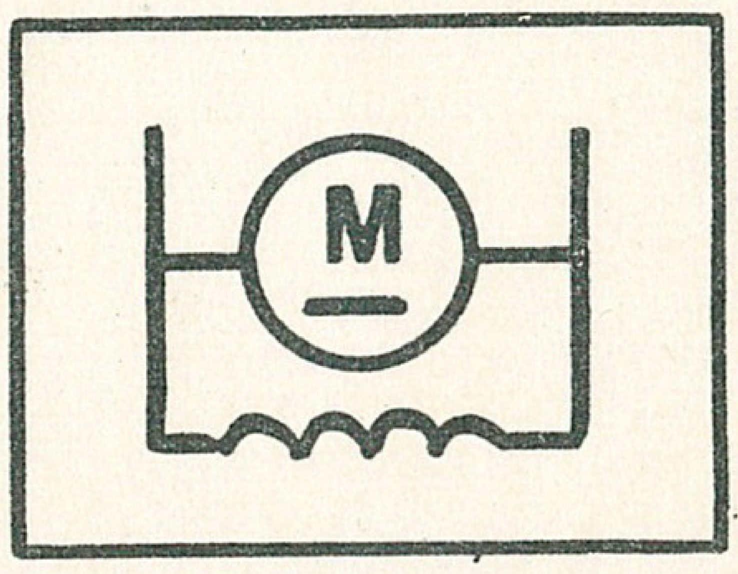
Машына асінхронная трохфазная з фазным ротарам, абмотка якога злучана зоркай; абмотка статара злучана трохвугольнікам



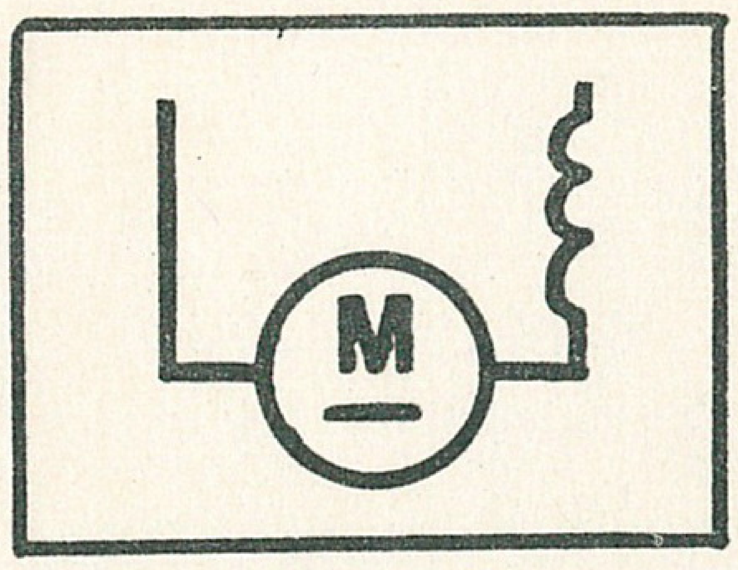
Машына асінхронная трохфазная з фазным ротарам, абмотка статара злучана зоркай з выведзеным нейтральным пунктам



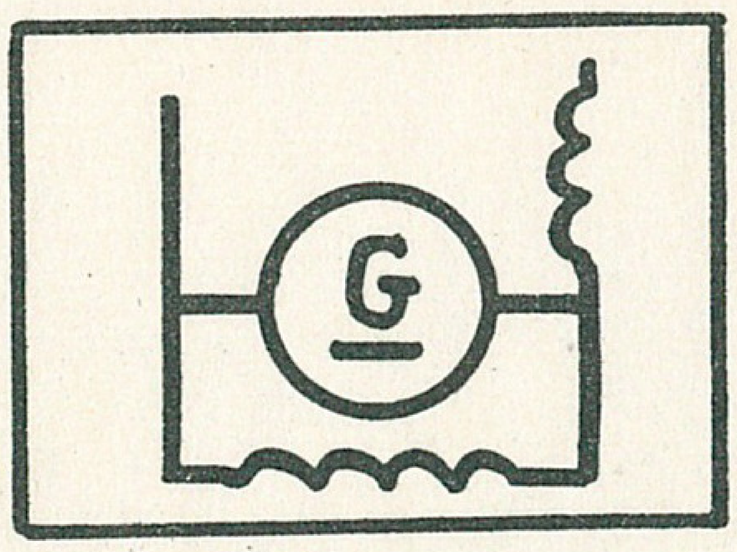
Машына пастаяннага току з паралельным узбуджэннем



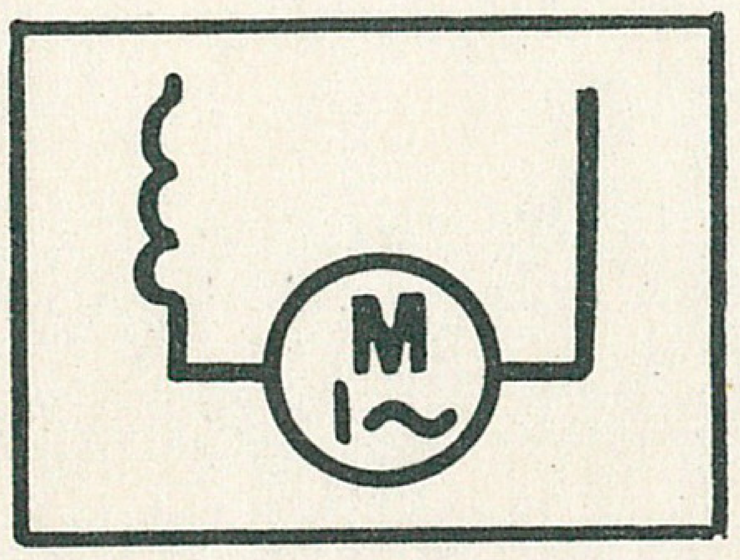
Машына пастаяннага току з паслядоўным узбуджэннем



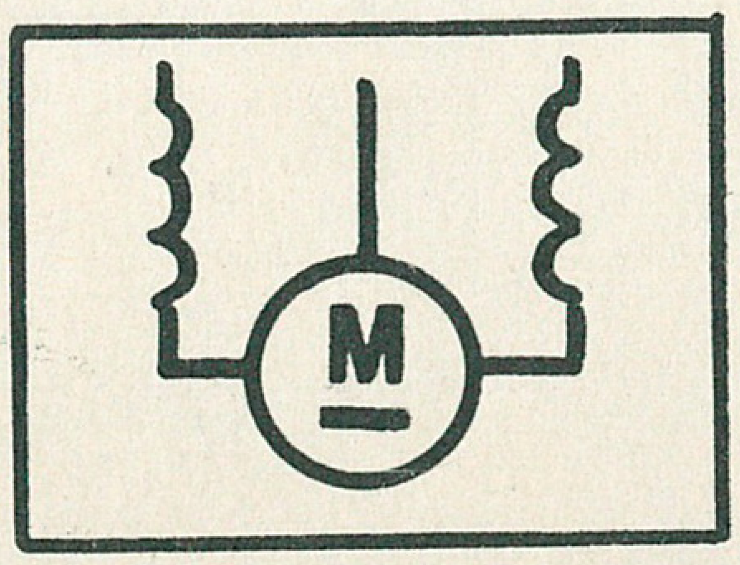
Машына пастаяннага току са смешаным узбуджэннем



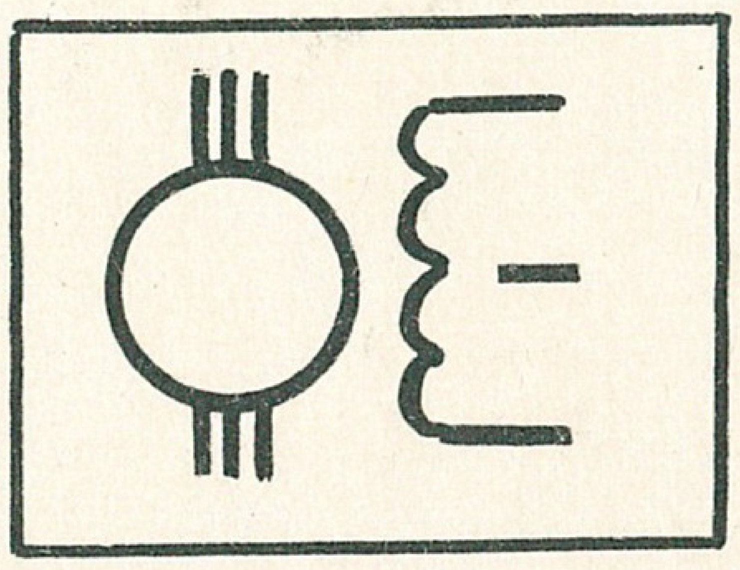
Рухавік калектарны аднафазны паслядоўнага ўзбуджэння



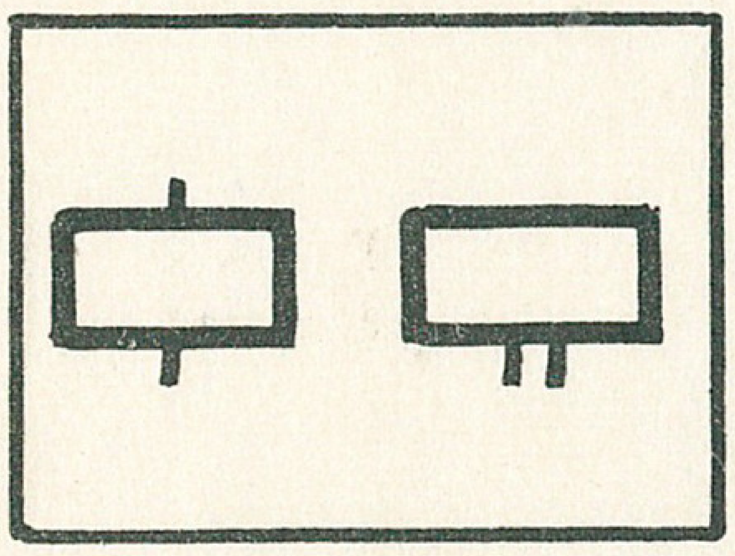
Рухавік пастаяннага току рэверсіўны з дзвюма паслядоўнымі абмоткамі ўзбуджэння



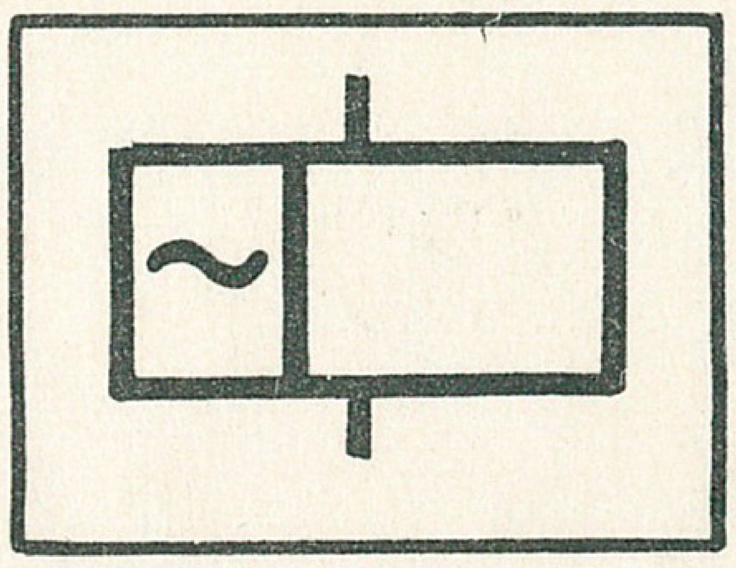
Генератар сінхронны трохфазны



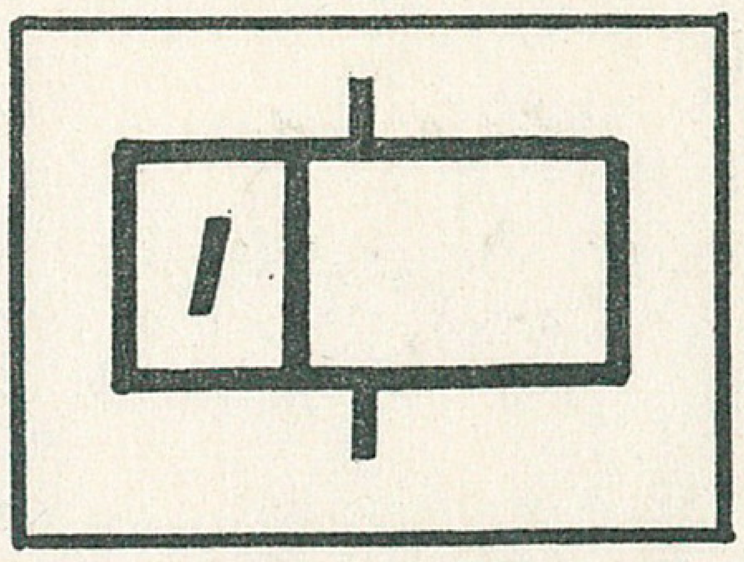
Шпуля электрамеханічнага ўстройства



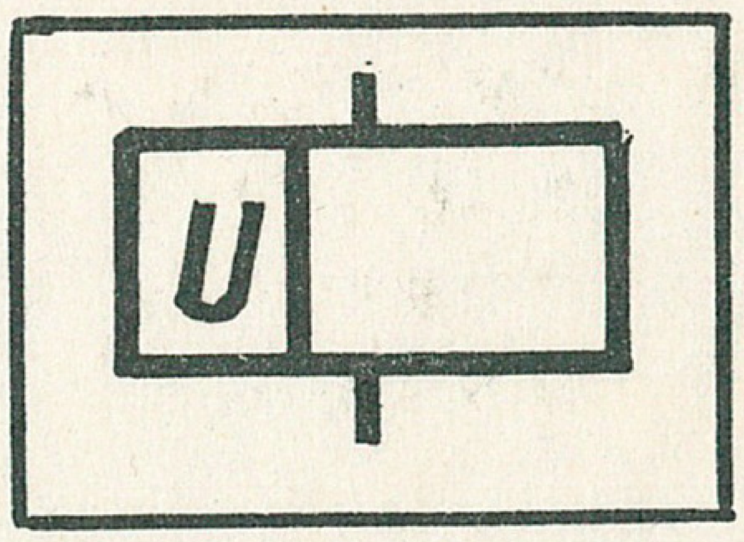
Электрамагніт пераменнага току



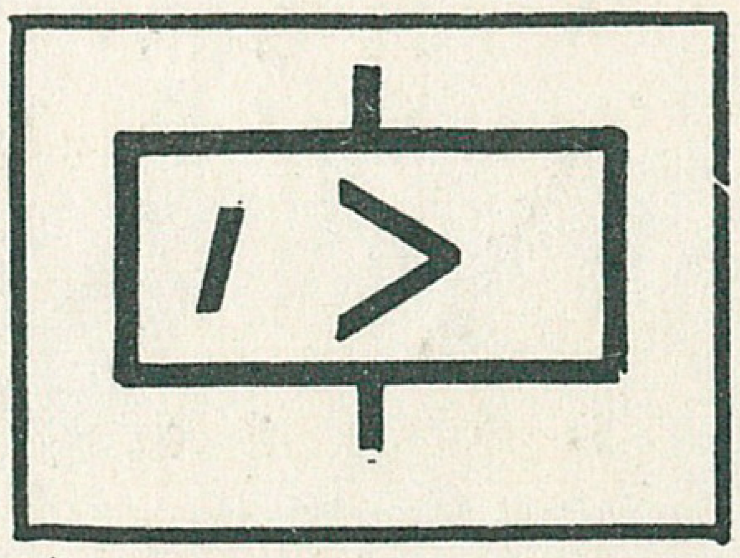
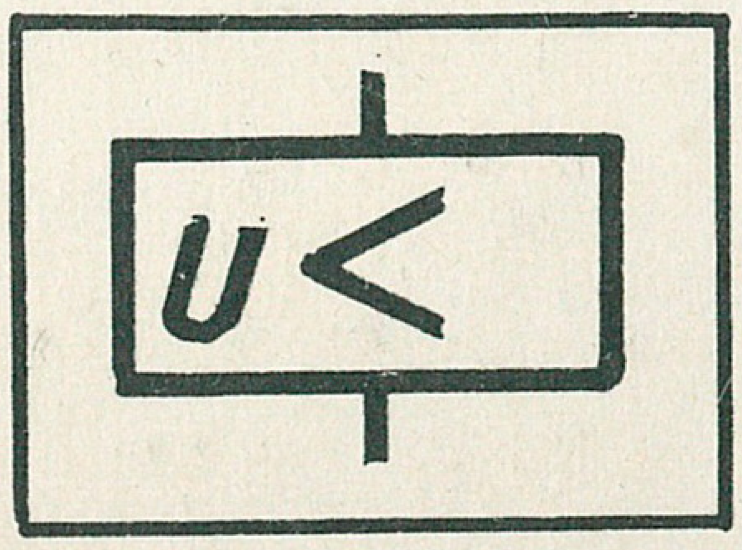
Рэле току



Рэле напружання



Рэле максімальнага току



Рэле мінімальнага напружання